ANNALES

DE

L'INSTITUT NATIONAL

DE LA

RECHERCHE AGRONOMIQUE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

ANNALES DE L'INSTITUT NATIONAL
DE LA
RECHERCHE AGRONOMIQUE

SÉRIE A

ANNALES AGRONOMIQUES

SCIENCE DU SOL - FERTILISATION - BIOCLIMATOLOGIE
PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

Année 1960

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

631. 871 : 631. 46.

L'ENFOUISSEMENT DES PAILLES DANS LE SOL ÉTUDE GÉNÉRALE ET RÉPERCUSSIONS SUR LA MICROFLORE DU SOL

PAR

M^{me} G. SIMON
Station d'Agronomie — Versailles

PLAN DU MÉMOIRE

INTRODUCTION

Idées anciennes sur la matière organique et sur ses rôles.
Idées actuelles sur l'humus.
Les problèmes posés par l'enfouissement des pailles.

PREMIÈRE PARTIE

ENFOUISSEMENT DES PAILLES ET CHIMIE DU SOL

CHAPITRE I

MÉTHODES ANALYTIQUES ET MODE OPÉRATOIRE

I. — Méthodes analytiques.
II. — Mode opératoire.
A) Détermination de l'azote ammoniacal.
B) Etat de la terre d'expérience.
C) Etat de la paille utilisée.

CHAPITRE II

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX EN PRÉSENCE D'UN APPORT D'AZOTE

I. — Azote ammoniacal.
A) Influence des doses croissantes d'azote.
B) Influence des quantités croissantes de paille.

C) Comparaison de la paille avec des substances plus simples : amidon et glucose.
D) Dégagement de gaz carbonique.
1° Sa mesure.
2° Influence des apports d'azote ammoniacal sur les dégagements de CO_2.
3° Relation entre les dégagements de CO_2 et la consommation d'azote minéral par les microorganismes.
E) Evolution du carbone de la paille.
1° Sa mesure.
2° Essais de fractionnement de la matière organique.
a) Emploi de réactifs chimiques.
b) Séparation par différence de densité.
F) Minéralisation de l'azote tranformé en azote oganique par les microorganismes.
G) Importance des facteurs physiques sur l'enfouissement des pailles.
1° Rôle de l'humidité.
2° Influence de l'aération (apport de sable, d'argile).
3° Influence de la température.
H) Influence de facteurs chimiques.
1° Expérience sur sable.
2° Expérience avec terre.
I) Influence de la richesse en azote de la paille enfouie.
J) Influence du pH de la terre.
II. — Azote nitrique.
A) Consommation de l'azote nitrique par les microorganismes.
B) Influence de la température sur cette consommation.
C) Dégagement de gaz carbonique lors d'apport d'azote nitrique.
III. — Azote organique.

Chapitre III

CONCLUSIONS PRATIQUES

INTRODUCTION

Depuis quelques dizaines d'années, nous avons assisté à une modification du système d'exploitation notamment dans les régions de grande culture. L'agriculteur s'est tourné de préférence vers la production végétale, abandonnant de plus en plus l'élevage, et cherchant à se passer du bétail « mal nécessaire ». Il faut ajouter à cela le développement croissant de la motorisation qui entraîne une disparition des bêtes de trait.

Ces deux faits conduisent aux mêmes conséquences : diminution de la production de fumier à la ferme, donc baisse des apports de matière organique dans les champs et par suite abaissement progressif de la teneur des terres en humus avec toutes les conséquences qui peuvent en

découler sur la fertilité du sol. Cet appauvrissement est lent mais sensible ainsi que l'ont montré les études de BARBIER (1) sur quelques fermes de l'Yveline et du Mantais (dans la région parisienne) où le cheptel est très réduit et où la majeure partie des pailles et fourrage est vendue (tableau 1).

TABLEAU 1

Évolution du carbone et de l'azote dans des terres après abandon de l'élevage.

Ferme sans élevage depuis	N °/oo	C %
30 ou 40 ans	1,02	1,97
20 ans	1,14	—
10 ans	1,25	2,44
1 an	1,40	3,0

Les agriculteurs continuent cependant à y obtenir de bons rendements, mais le succès est dû d'une part aux réserves importantes contenues dans le sol, d'autre part au retour au sol chaque année de grosses quantités de déchets de récolte ainsi qu'à l'enfouissement de la dernière coupe de luzerne.

L'état humique de ces terres est encore satisfaisant puisque le taux de matière organique est rarement inférieur à 2 p. 100, chiffre qui indique la limite au-dessous de laquelle on observe une altération des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Cependant, si ce système d'exploitation est prolongé, le taux de matière organique continuera à diminuer progressivement au cours des décades à venir et par suite la productivité de ces champs s'abaissera lentement.

Réapprovisionner certains sols appauvris en humus, maintenir constant le taux d'humus dans les autres sols, doivent être, par conséquent, les préoccupations actuelles de ces agriculteurs. Ceux-ci ont à leur disposition plusieurs solutions : enfouissement de gadoues, d'engrais verts, utilisation de la paille. Généralement, ils préfèrent alors à la fabrication de fumier artificiel, une solution plus simple et plus économique : l'enfouissement direct des pailles ; c'est cette question, tout à fait d'actualité, qui constituera l'objet de ce travail.

Idées anciennes sur la matière organique et sur ses rôles.

Déjà dans les temps très anciens, les agriculteurs épandaient périodiquement du fumier sur leurs champs et assuraient ainsi une certaine fertilité à leurs terres ; mais pour eux le fumier n'avait qu'un rôle nourricier.

Beaucoup plus tard, au seizième siècle, Bernard PALISSY (2) admet-

tait encore ce rôle de la matière organique, mais déjà il accordait une part importante aux matière minérales continues dans le fumier. C'est ainsi qu'il disait «le fumier ne sert que par le sel que laissent la paille et le foin en pourrissant ». Par le mot sel, il désignait le résidu fixe que fournissent toutes les matières végétales brûlées ou abandonnées à la putréfaction. Ainsi, seuls les éléments minéraux du fumier lui semblaient être utiles aux plantes.

De même, après lui, LAVOISIER écrivait « la fermentation, la putréfaction et la combustion rendent partiellement à l'air de l'atmosphère et au régime minéral les principes que les animaux et les végétaux en ont empruntés ».

Un peu plus tard même, LIEBIG n'hésita pas à affirmer catégoriquement qu'on pouvait remplacer le fumier par des éléments purement minéraux. Pour lui aussi, le fumier ne servait que par les substances minérales qu'il contenait : il permettait la restitution au sol de la majeure partie de ce qui a été exporté par les récoltes, le complément étant fourni par des éléments minéraux, les seuls utiles aux plantes. Cette théorie minérale, simple et séduisante, révolutionna l'agriculture. On n'admit alors comme substances indispensables que celles qui font partie des cendres des plantes. Mais LIEBIG s'aperçut très vite de ses erreurs.

En France, BOUSSINGAULT, (1) combattit les idées de son contemporain. « Si, disait-il d'une façon amusante, les parties minérales des engrais sont seules utiles, nous sommes, il faut le reconnaître, nous autres cultivateurs, de bien grands maladroits. Depuis des milliers d'années, nous nous donnons la peine de transporter péniblement nos fumiers de la ferme aux champs. Nos attelages nous coûtent cher ; faisons mieux, brûlons nos fumiers, nous aurons ainsi une toute petite quantité de cendres et pour la transporter une brouette fera l'affaire. »

BOUSSINGAULT démontra alors que pour une récolte donnée, le rendement en présence d'une quantité de fumier était supérieur à celui obtenu quand on apporte seulement les matières minérales contenues dans la même quantité de fumier. L'alimentation des plantes se ferait par conséquent aux dépens, non seulement des matières minérales, mais aussi des matières organiques contenues dans le fumier. On négligeait encore tous les autres rôles aussi bien physiques que chimiques joués par les matières organiques et leurs produits de décomposition. On ne connaissait pas encore l'humus, ni ses propriétés. On ne soupçonnait pas l'existence des microorganismes. Il fallut attendre PASTEUR pour affirmer qu'en plus des plantes et des animaux, il existe des microbes qui participent au cycle de la vie en minéralisant les résidus animaux et végétaux et en les transformant en produits assimilables par les plantes.

(1) Cette citation de Boussingault provient du Traité de chimie agricole de Déhérain (1892) p. 397.

Idées actuelles sur l'humus.

Les découvertes de PASTEUR ont ouvert la voie à de nombreuses recherches faites sur les microorganismes, notamment sur les rôles qu'ils jouent au cours des processus de dégradation et d'humification.

Les matières organiques, dans le sol ou à la surface du sol, subissent l'attaque immédiate de la microflore du sol, attaque qui est d'ailleurs variable suivant la nature des constituants ; certains de ceux-ci, tels que les glucides simples, les amidons, sont dégradés rapidement ; d'autres comme la cellulose, les hémicelluloses le sont moins. Les lignines et les cires, par contre, plus résistantes, tendent à disparaître très lentement mais jamais complétement.

Les processus de décomposition, sont accompagnés de processus de synthèse de substance microbienne : synthèse de protéines qui, avec la lignine, formeraient la charpente de l'humus. Il y aurait également d'après des études récentes de SCHOEFFER (3) intervention de champignons et d'actinomycètes dans la formation de produits colorés quinoniques qui, polymérisés, donneraient naissance à l'humus.

En résumé, la formation de l'humus, à partir de résidus organiques animaux et végétaux, comprend une perte de constituants facilement décomposables, un gain de substances microbiennes formées, et une synthèse de composés plus résistants. Il y a eu longtemps une certaine confusion et les auteurs n'étaient pas d'accord sur ce que désignait le mot humus. Pour certains, c'était la totalité de la matière organique, pour d'autres, simplement une fraction. L'humus, pour WAKSMAN (4). serait constitué de nombreux complexes organiques divisibles en deux groupes :

— un groupe majeur dont 40 p. 100 seraient occupés par la lignine et ses dérivés combinés avec des protéines,

— et un groupe mineur comprenant des hydrates de carbone, des graisses, des acides organiques, des alcools et autres composés organiques.

Au cours du temps, l'humus se décompose très lentement et il existe un équilibre entre sa synthèse et sa destruction. La quantité de matière organique qui se détruit par unité de temps est d'après HENIN (5) à peu près proportionnelle au taux initial d'humus, taux qui ne doit pas s'abaisser au-dessous d'un minimum critique voisin de 2 p. 100 de matières organique, sinon la fertilité des sols est compromise : terres sableuses sans cohésion, terres limoneuses battantes, diminution de la porosité et de la stabilité dans les terres argileuses, diminution de la capacité de rétention de l'eau, de la capacité d'inhibition d'où augmentation de l'érosion.

Des rôles chimiques, non moins importants, sont également joués par l'humus qui constitue la réserve d'une grande partie des éléments

minéraux nécessaires à l'alimentation des végétaux : éléments mineurs et éléments majeurs, en particulier l'azote dont les deux tiers nécessaires à une récolte proviennent de la minéralisation progressive des matières humiques. L'humus est également le support de toute vie microbienne : c'est le siège de phénomènes microbiens très importants pour l'agriculture, tels que l'humification, l'ammonification, la nitrification, etc.

De tout ceci, il résulte que la conservation de la fertilité d'un sol est liée à la conservation de l'humus dans ce sol. Aussi les agriculteurs ont-ils intérêt à continuer les apports de matières organiques dans leurs champs, apports qu'ils ont eu souvent tendance à négliger ces derniers temps pour accorder toute faveur aux engrais minéraux leur donnant des résultats spectaculaires et immédiats.

Des résultats souvent fort variables sont obtenus au champ, lors des enfouissements de paille.

Or, l'azote joue un rôle primordial dans la réussite de cette pratique culturale. Il est en effet conseillé d'apporter de l'azote minéral lors des enfouissements des pailles, car celles-ci, riches en composés carbonés facilement décomposables (hemicelluloses, cellulose) ont un rapport C/N élevé, voisin de 70-80 et l'azote y est présent en trop faible quantité par rapport au carbone. Aussi, au cours de leur décomposition, si aucune addition d'azote n'est faite, les microorganismes dont les besoins s'accroissent, puiseront dans le sol le complément d'azote assimilable nécessaire à leurs synthèses ; ainsi plantes et microorganismes entreront en concurrence pour la nutrition azotée et des symptômes de faim d'azote apparaîtront sur les cultures.

« Il est très difficile, comme le relate Barbier (6) de déterminer la dose d'azote susceptible de compenser l'effet « déminéraliseur » de la paille, même dans nos régions tempérées. Selon les circonstances météorologiques, la paille peut se décomposer plus ou moins vite et l'on risque soit la verse si l'azote temporairement immobilisé par la paille se minéralise assez tôt, soit le déficit de rendement si cet azote se reminéralise trop tard. »

Les recherches entreprises dans la première partie de notre travail ont pour but, grâce à des expériences de laboratoire, d'une part de déterminer la quantité d'azote qu'il faut ajouter lors d'un enfouissement de paille pour éviter un effet dépressif sur la culture suivante, et d'autre part de préciser les conditions optima de décomposition de ces pailles, afin de permettre aux agriculteurs de tirer le meilleur profit possible de cette technique culturale. La deuxième partie porte sur l'étude des microorganismes qui jouent un rôle dans cette décomposition. Enfin, des essais d'applications pratiques de certaines données obtenues au laboratoire, sont entrepris dans la troisième partie du travail.

PREMIÈRE PARTIE

ENFOUISSEMENT DES PAILLES ET CHIMIE DU SOL

CHAPITRE PREMIER

MÉTHODES ANALYTIQUES ET MODE OPÉRATOIRE

I. — MÉTHODES ANALYTIQUES

Au cours de ce travail nous utilisons fréquemment les méthodes employées par DROUINEAU (7) dans son étude sur l'azote minéralisable des terres.

L'azote ammoniacal est dosé par distillation des extraits de sol (obtenu avec du chlorure de calcium) en présence de magnésie fraîchement calcinée. La distillation de l'extrait de sol en présence de magnésie et d'un peu d'alliage DEWARDA (8) (poudre de zinc, cuivre et aluminium) permet d'obtenir en même temps les deux formes d'azote minéral : azotes ammoniacal et nitrique : l'azote nitrique est alors très facile à calculer par simple différence.

L'indicateur, habituellement employé, est le mélange TASHIROV (bleu de méthylène + rouge de méthyle) (9) qui vire du rouge en milieu acide au vert en milieu alcalin en passant par une teinte grisâtre, mal définie, pour un pH de 5,5-6,0. Il est nécessaire de calciner la magnésie, sinon le gaz carbonique qu'elle peut contenir gêne le virage de l'indicateur.

Tous les réactifs sont préparés à partir d'eau permutée qui, par suite de son passage sur des permutites, contient moins d'azote ammoniacal que l'eau distillée et permet ainsi d'obtenir des témoins ne renfermant que de très faibles quantités d'azote.

La méthode KJELDAHL est employée pour estimer l'azote total des terres. Souvent nous préférons au mélange catalyseur, sulfate de potassium + sulfate de cuivre, le mercure avec lequel nous avons la possibilité de doser simultanément toutes les formes d'azote, y compris l'azote nitrique.

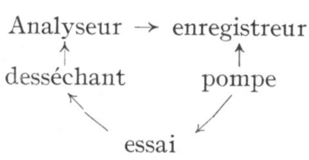
Le carbone des prises d'essais est dosé suivant la méthode ANSTETT (10) qui n'est qu'une variante de la méthode ANNE (11). Le principe en est

le même : oxydation de la matière organique en milieu sulfurique par du bichromate, et titrage de l'excès de ce dernier avec du sel de Mohr en présence de diphénylamine-sulfurique.

Les prises d'essais étant riches en carbone, le bichromate est utilisé en poudre et non en solution comme dans la méthode ANNE.

Les dégagements de gaz carbonique au cours de la décomposition des pailles sont mesurés avec un analyseur de gaz de type ONERA (12) dont le fonctionnement est basé sur l'absorption de l'infra-rouge par le gaz carbonique. Les essais mis dans des erlenmeyers, fermés et débarrassés de CO_2 au départ, sont branchés sur l'analyseur à intervalles réguliers. Les teneurs en CO_2 s'inscrivent sur l'enregistreur. Après chaque mesure, l'air des erlenmeyers est renouvelé par un air sans gaz carbonique, afin d'éviter une accumulation trop importante de CO_2 dans les essais.

Dans ces expériences, l'appareil fonctionne en circuit fermé. Un desséchant, constitué de chlorure de calcium sec en paillettes, est intercalé entre l'essai et l'analyseur. Il permet ainsi d'arrêter la vapeur d'eau qui pourrait fausser les résultats. La pompe, qui se doit d'être étanche, fonctionne en pompe aspirante et refoulante. Quelques minutes doivent s'écouler après la mise dans le circuit de l'essai avant que le brassage de tout l'air soit parfait : la teneur du circuit en CO_2 s'inscrit alors sur l'enregistreur.



II. — MODE OPÉRATOIRE

La majorité des expériences est faite avec l'horizon A d'une terre argilo-calcaire des environs de Versailles, dite terre des Petits Closeaux et dont voici les analyses physique et chimique :

pH	8,0 %	CO_3Ca	9,5 %
Argile	21 %	Azote (méthode KJELDAHL)	1,5 ‰
Limon	18,6 %	Carbone	1,81 ‰
Sable grossier	1,7 %	Matières humiques	4 ‰
Sable fin	46 %	Nitrates	0,01 ‰
		Azote ammoniacal	0

Afin de faire une étude théorique de la question, nous avons été amenés à reproduire à petite échelle un enfouissement de pailles. Il est bien évident que les conditions d'expérience diffèrent légèrement de ce qui se passe dans la nature, mais il fallait bien se placer dans des conditions définies, par conséquent artificielles. Dans des béchers de 250 cc,

la terre est mélangée intimement à la matière organique et à l'azote minéral mis en solution. Le tout est amené à 20 p. 100 d'humidité (1), taux qui paraît suffisant en ce qui concerne notre terre pour obtenir une bonne homogénéisation et une bonne humectation du mélange. Les béchers, recouverts d'un verre de montre, sont alors mis pour des temps variables dans une étuve, réglée à 28° et dans laquelle on entretient une atmosphère humide avec des cristallisoirs remplis d'eau. L'humidité des essais qui y séjournent plus de 10 jours est vérifiée et corrigée à intervalles réguliers.

A. — Détermination de l'azote ammoniacal.

Il faut s'assurer tout d'abord qu'une partie de l'azote minéral apporté le plus souvent sous forme de sulfate d'ammonium, ne disparaît pas à l'état d'ammoniac gazeux au cours de son séjour dans l'étuve à 28°. Pour cela, des dosages d'azotes totaux sont faits sur les mélanges avant et après passage à l'étuve à 28°.

Le mélange en question comprend :

100 g terre, 2 g paille et 20 cc d'une solution de $SO_4(NH_4)_2$ contenant 5 mg d'N par cc, soit au total 100 mg N.

La méthode de DROUINEAU (7) est utilisée pour évaluer l'azote nitrique et la méthode KJELDAHL ($SO_4Cu + SO_4K_2$ comme catalyseur) pour les autres formes d'azote.

— Avant passage à l'étuve nous trouvons :

méthode de DROUINEAU :	1 mg	d'N (nitrique) dans 100 g terre.
méthode de KJELDAHL :	6,3 mg	N dans 2 g paille.
	150,5 mg	N dans 100 g terre
soit un total de :	157,8 mg	N

auxquels il faut adjoindre les 100 mg d'azote ajoutés.

— Après 10 jours dans l'étuve à 28° :

méthode de DROUINEAU :	4,5 mg	N (nitrique) dans le mélange.
méthode de KJELDAHL :	254,1 mg	N » »
	258,6 mg	N

Aux erreurs d'expérience près, les deux chiffres obtenus sont identiques. Tous les essais peuvent donc être faits à la température de 28°, sans crainte de volatilisation de l'azote ammoniacal.

Les extractions d'azote minéral se font avec une solution de chlorure de calcium, à peu près neutre et dont la concentration est double de la concentration normale (110 g de Cl_2Ca technique anhydre par litre).

(1) Ainsi pour humidifier 100 g de terre séchée à l'air, on ajoute 20 cc de solution.

Les mélanges (terre + matière organique + N minéral) sont agités une demi-heure en présence de 500 cc de cette solution de chlorure de calcium et les distillations sont faites sur le filtrat. Généralement, elles se font sur 100 cc, mais le volume de la prise d'essai peut varier suivant la richesse de celle-ci en azote.

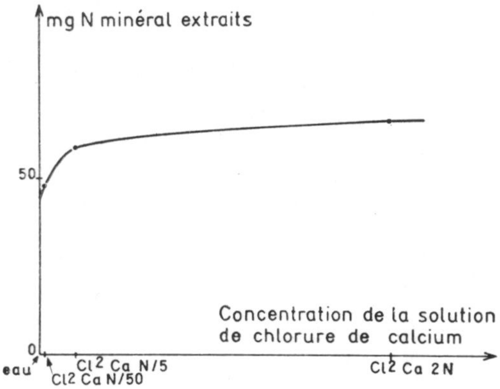
TABLEAU 2

Influence de la concentration de la solution de chlorure de calcium sur l'extraction de l'azote minéral des sols.

Réactif d'extraction : concentration	Mg d'azote ammoniacal extrait	Mg d'azote nitrique extrait	Mg d'azote minéral total extrait
Eau permutée	38,15	3,85	42
Cl_2Ca, N/50	45,15	2,85	48
Cl_2Ca, N/5	55,6	3,55	59,15
Cl_2Ca, 2 N	64,05	2,45	66,5

Extraction des mélanges (100 g terre + 2 paille + 100 mg d'azote ammoniacal) après un passage de 7 jours à l'étuve à 28°.

Nous avons employé le chlorure de calcium, car une simple extraction à l'eau permutée ne suffit pas à extraire tout l'azote minéral de la terre (tableau 2 et graphique 1).



GRAPHIQUE 1. — Influence de la concentration de la solution de chlorure de calcium sur l'extraction de l'azote minéral des sols.

Aucun des réactifs utilisés ne permet de retrouver les 100 mg d'azote ammoniacal introduits : ces résultats, faibles, sont dûs à une consommation d'azote minéral par les microorganismes en 7 jours à 28°.

Une seconde expérience est faite, à la glacière cette fois, pour éviter tout développement microbien et par suite supprimer toute utilisation d'azote ammoniacal.

Les essais comprennent seulement 100 mg d'azote ammoniacal mélangés à 100 g de terre. Après un séjour de 24 heures à la glacière, 50 p. 100 de l'azote ammoniacal ajouté à la terre ne sont pas retrouvés avec une agitation à l'eau permutée seule. Le chlorure de calcium, 2 N, par contre, se révèle encore comme le meilleur réactif d'extraction (tableau 3), aussi est-ce lui qui est utilisé dans toutes nos expériences.

TABLEAU 3

Comparaison entre l'eau permutée et le chlorure de calcium 2N pour l'extraction de l'azote minéral des sols.

Réactif d'extraction utilisé	Mg d'N ammoniacal extrait	Mg d'N nitrique extrait	Mg d'N minéral total extrait	Mg d'N minéral manquant
Eau permutée neutre .	49,7	0,35	50,05	49,95
Cl_2Ca, 2 N, neutre ...	86,8	1,05	87,85	12,15

Extraction des mélanges (100 g de terre + 100 mg N ammoniacal) après un séjour d'un jour à la glacière.

Tout l'azote ammoniacal ajouté, n'est cependant pas retrouvé, avec Cl_2Ca, 2 N, même en absence de tout phénomène microbien. Il y aurait un phénomène physico-chimique de fixation de NH_4, processus déjà observé par MAC BETH (13) pour des sols semi-arides.

Plus récemment, des auteurs américains (14) ont étudié cette *fixation physico-chimique*. Ils ont trouvé que la terre humide fixe de l'ammonium qui ne peut plus s'extraire par une solution normale de chlorure de potassium. Il y aurait une fixation par les minéraux argileux (montmorillonite et illite surtout) qui serait, naturellement, d'autant plus importante que la proportion de terre mise au contact du sulfate d'ammonium est plus grande, ce que nous avons d'ailleurs vérifié (tableau 4).

TABLEAU 4

Influence de la quantité de terre sur la fixation physico-chimique de l'ammonium.

Proportion de terre mise au contact du sulfate d'ammonium	Pourcentage d'azote ammoniacal fixé par voie physico-chimique
100 g	10,25
300 g	25,10
500 g	34,20

L'expérience porte sur les mélanges (terre en poids variable + 100 mg d'azote ammoniacal + eau en quantité suffisante pour amener le mélange à 20 p. 100. d'humidité). Extraction après 24 heures de séjour des mélanges dans l'étuve à 28°

Cette fixation disparaît après chauffage de la terre à l'autoclave ; en effet la chaleur modifie la structure du complexe absorbant qui, par suite, ne peut plus fixer l'azote ammoniacal. De plus, comme ALLISON, nous trouvons un pourcentage de fixation d'autant plus grand que les quantités d'azote ammoniacal ajoutées à la terre sont plus faibles (tableau 5) (graphique 2).

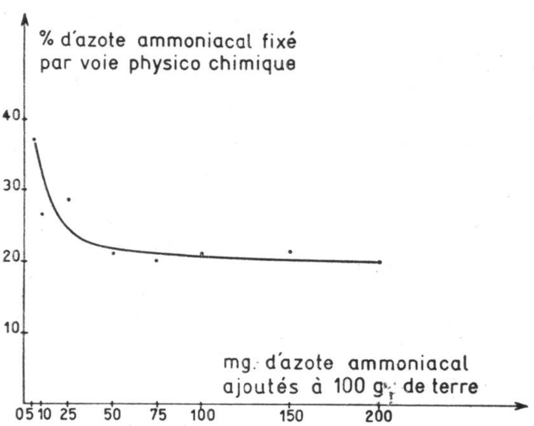
TABLEAU 5

Influence de la quantité d'azote ammoniacal ajoutée à la terre sur la fixation physico-chimique de l'ammonium.

Mg d'azote ammoniacal ajouté	Mg d'azote ammoniacal fixé par la terre par voie physico-chimique	Pourcentage d'azote ammoniacal fixé par voie physico-chimique
5	1,85	37
10	2,65	26,5
25	7,15	28,6
50	10,45	20,9
75	15,0	20
100	21,05	21,05
150	32,05	21,3
200	39,35	19,7

Résultats obtenus après 10 jours d'étuve à 28° pour les mélanges contenant (100 g terre + quantité variable d'azote ammoniacal). Humidité 20 p. 100.

Il est parfois arrivé à ALLISON d'obtenir des pourcentages de fixation encore plus élevés atteignant 50 p. 100 ; ceci d'ailleurs peut fournir



GRAPHIQUE 2. — Fixation physico-chimique de l'azote ammoniacal par la terre des petits Closeaux.

une explication partielle à des observations faites fréquemment dans la pratique : par suite de sa rétention par le complexe argileux et de son passage sous des formes moins assimilables par les plantes, l'azote ammoniacal semble donner de moins bons résultats immédiats que l'azote nitrique.

Dans toutes nos expériences, nous devons tenir compte de cette fixation physico-chimique d'azote ammoniacal par la terre. Aussi, pour chaque essai, faisons-nous un témoin sans matière organique.

La quantité d'azote minéral obtenue par différence entre la quantité d'azote minéral retrouvée en absence de matière organique et celle évaluée en présence de cette même matière, représente l'azote minéral consommé par les microorganismes, qui, pendant le temps considéré, se sont développés aux dépens de cette matière organique.

Dans le cas d'apport d'azote ammoniacal, la plus grande partie de l'azote minéral consommé l'est sous forme ammoniacale. Une très petite quantité doit l'être sous forme nitrique. Elle provient de la nitrification de l'azote ammoniacal, lors du séjour des essais à 28°, pendant le temps considéré.

B. — État de la terre d'expérience.

Avant d'entreprendre l'étude chimique de la décomposition des pailles, une deuxième question se pose : dans quel état doit être la terre? A priori, on peut penser que la terre fraîchement prélevée convient mieux que la terre séchée à l'air.

Des essais identiques, faits avec les deux terres, ramenées à la même humidité (20 p. 100) fournissent les résultats suivants :

TABLEAU 6

Influence de l'état de fraîcheur de la terre sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

	Mg d'azote ammoniacal retrouvés	Mg d'azote minéral (NH_4 + NO_3) retrouvés	Mg d'azote nitrique formés	Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes
100 g terre sèche + 100 mg N (NH_4) dans 20 cc.	80	82,6	2,6	12,6
100 g terre sèche + 100 mg N (NH_4) dans 20 cc + 2 g paille.	65,1	70	4,9	
110 g terre humide (humidité 10 %) + 100 mg N (NH_4) dans 10 cc	80	83,7	3,8	13,35
110 g terre humide (humidité 10 %) + 100 mg N (NH_4) dans 10 cc + 2 g paille	64,2	70,35	6,5	

Résultats obtenus après 10 jours d'étuve à 28°.

Les résultats, aux erreurs d'expérience près, sont identiques avec peut-être, une nitrification plus active dans la terre fraîche. Les microorganismes, à l'état de vie ralentie dans la terre séchée, reprennent immé-

diatement leur activité dès qu'ils se trouvent placés dans des conditions de température et d'humidité favorables (28° et 20 p. 100 d'humidité).

Pour la commodité des manipulations, nous utilisons de la terre séchée à l'air ; il est ainsi facile d'en tamiser à l'avance une grosse quantité qui servira pour tous les essais.

C. — État de la paille utilisée.

Un dernier point reste encore à préciser. Faut-il enfouir la paille en poudre ou hachée ? Les expériences suivantes nous donnent la solution (tableau 7).

TABLEAU 7

Comparaison de la paille fine en poudre et de la paille hachée, en ce qui concerne la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

	Mg d'azote ammoniacal retrouvés	Mg d'azote minéral (NH_4 + NH_3) retrouvés	Mg d'azote nitrique formés	Mg d'azote minéral consommés par les micro-organismes
Après 10 jours d'étuve à 28°				
100 g terre + 100 mg N (NH_4)..	79,1	83,65	4,55	
100 g terre + 100 mg N (NH_4) + 2 g paille fine...............	63	69,65	6,65	14
100 g terre + 100 mg N (NH_4) + 2 g paille hachée............	70,2	74,5	4,30	9,1
Après 20 jours d'étuvé à 28°				
	65,1	83,5	18,4	
	52,15	68,25	16,10	15,25
	53,9	71,4	17,5	12,10
Après 30 jours d'étuve à 28°				
	45,6	84,7	39,1	
	26,1	71,4	45,3	13,3
	36,4	71,9	35,5	12,8

Les pailles broyées se décomposent beaucoup plus facilement et par suite plus rapidement, si bien que la consommation d'azote après 10 jours d'étuve est plus importante dans le cas d'une paille en poudre que dans celui d'une paille hachée, mais la différence s'atténue peu à peu et finalement après 30 jours, la consommation devient à peu près la même dans les deux cas (tableau 7).

Pour faciliter l'homogénéisation des mélanges (terre + paille) d'une part et pour augmenter d'autre part la vitesse des réactions, nous préférons utiliser la paille finement broyée.

En résumé, l'étude chimique au laboratoire de l'enfouissement des pailles est faite à 28°, avec la terre des Petits Closeaux, séchée à l'air, et avec de la paille finement broyée.

CHAPITRE II

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les pailles, enfouies dans le sol sont décomposées par des microorganismes spécialisés qui utilisent pour leurs synthèses de l'azote, et plus particulièrement de l'azote minéral. Si cet élément est en quantité insuffisante dans le sol, il y a concurrence entre les microorganismes et les plantes ; l'azote du sol est alors consommé par des microorganismes aux dépens des cultures qui accusent une « faim d'azote « ; c'est pourquoi il est recommandé d'ajouter de l'azote minéral lors de l'enfouissement des pailles.

Une partie de notre travail est consacrée à l'étude en laboratoire du comportement des différentes formes d'azote ajoutées au mélange (terre + paille).

EN PRÉSENCE D'UN APPORT D'AZOTE

I. — AZOTE AMMONIACAL

En premier lieu, nous avons suivi la consommation dans le temps de l'azote ammoniacal par les microorganismes.

TABLEAU 8

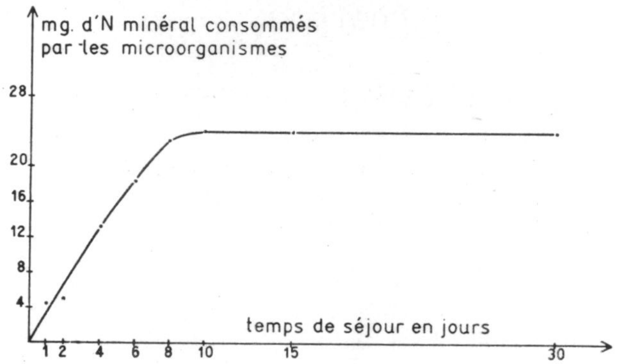
Consommation de l'azote ammoniacal par les microorganismes au cours du temps.

Temps de séjour à l'étuve à 28°	1 heure	1 jour	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours	10 jours	15 jours	30 jours
Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes	0,05	4,4	4,9	13,3	18,3	23	24	24	24

L'expérience porte sur les mélanges 100 g terre + 100 mg N (NH_4) ± 2 g paille.

La consommation d'azote ammoniacal est très rapide (tableau 8). Dès le 10e jour, elle atteint son maximum et s'arrête (graphique 3) bien que la décomposition de la paille se poursuive ainsi que nous le verrons plus tard.

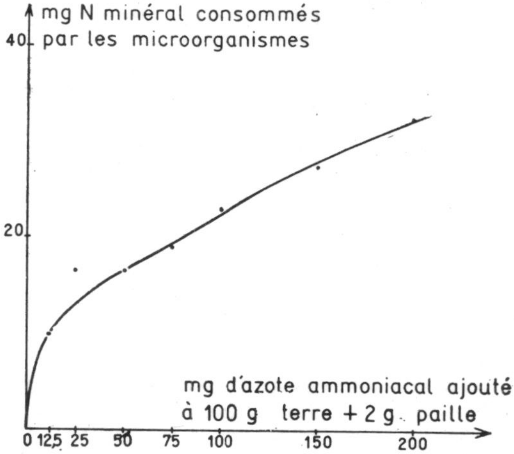
Dix jours de séjour dans l'étuve nous paraît alors être un temps adéquat pour faire une étude systématique de l'enfouissement des pailles.



GRAPHIQUE 3. — Influence de la durée du séjour à 28° sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes

A. — Influence des doses croissantes d'azote.

Pour un même poids de paille les microorganismes consomment d'autant plus d'azote qu'ils en ont plus à leur disposition (tableau 9) ; (graphique 4) tout au moins pour les doses d'azote ammoniacal utilisées.



GRAPHIQUE 4. — Action des doses croissantes d'azote ammoniacal sur la consommation des microorganismes

ceci d'ailleurs a été vérifié par BARBIER (15) dans des expériences au champ dans les Grands Closeaux (Versailles).

TABLEAU 9

Influence de l'azote ammoniacal sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Mg d'azote ammoniacal ajouté à 100 g terre ± 2 g paille	12,5	25	50	75	100	150	200
Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes	10,2	16,2	16,1	18,9	22,9	27,2	32,5
Pourcentage d'azote minéral consommé.	81,6	64,8	32,2	25,2	22.9	18,2	16,2

Essais ayant séjourné 10 jours à 28°.

B. — Influence des quantités croissantes de paille.

TABLEAU 10

Influence des quantités croissantes de paille sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Grammes de paille ajoutés au mélange (100 g terre + 100 mg N (NH_4))	0,5	1	2	4	6
Mg d'azote ammoniacal retrouvés	72,5	69,2	62,7	54,2	51,4
Mg d'azote nitrique formés	5,9	3,2	2,3	1,6	1,5
Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes.	5,8	11,5	19,2	28,4	31,3
Azote consommé pour 100 de paille ajoutée	1,16	1,15	0,96	0,71	0,52

Résultats trouvés après un séjour des mélanges de 10 jours dans l'étuve à 28°.

La même expérience est refaite avec une dose d'azote ammoniacal beaucoup plus faible (12,5 mg), ceci afin de se rapprocher des conditions pratiques (tableau 11). En règle générale, seule la récolte de paille, soit à l'hectare 50 quintaux environ, est enfouie sur place.

TABLEAU 11

Influence des quantités croissantes de paille sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Grammes de paille ajoutés au mélange : 100 g terre + 12,5 mg N (NH_4).	0,5	1	2	4	6
Mg d'azote ammoniacal retrouvés	4,2	2,8	0	0	0
Mg d'azote nitrique formés	5,25	3,15	1,75	0,7	0
Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes.	3	6,5	10,75	11,8	12,5
Pourcentage d'azote minéral consommé	24	52	86	94,4	100

Essais ayant séjourné 10 jours à 28°.

La quantité d'azote minéral utilisée par les microorganismes est importante et croît avec la quantité de paille présente dans le milieu.

Cet « azote minéral consommé par les microorganismes » est transformé en azote organique microbien, inutilisable immédiatement par les végétaux. Cette consommation peut atteindre 100 p. 100, s'il y a beaucoup de paille pour peu d'azote : dans ce cas, l'azote devient un facteur limitant pour la décomposition de la paille.

L'azote ammoniacal, ajouté à la paille, commence à se nitrifier en 10 jours, et la quantité d'azote nitrique formée diminue avec les doses croissantes de paille ; deux hypothèses semblent possibles : les nitrates sont utilisés par les microorganismes au même titre que l'azote ammoniacal ; la nitrification est modifiée en présence de paille, nous le verrons ultérieurement en faisant l'étude microbiologique de la question.

Dans la pratique, les quantités de paille et d'azote incorporées au sol sont beaucoup plus faibles que celles employées dans nos expériences : l'azote est alors utilisé au maximum.

Ces essais indiquent une consommation d'azote minéral égale au moins à 1,2 p. 100 de la paille ajoutée (tableau 10). Il faut par conséquent, lorsqu'on enfouit directement la paille dans le sol, doubler au moins les quantités d'azote préconisées dans la fabrication du fumier artificiel (5 kg d'azote par tonne de paille) si on veut éviter un effet dépressif sur la culture (16). Nos résultats sont à rapprocher de ceux obtenus dans la pratique par exemple par Soubies (17) à la Station Agronomique de l'O. N. I. A. (Toulouse). Ce dernier recommande, pour avoir des résultats équivalents à ceux donnés par un fumier naturel moyen, d'enfouir en même temps que les pailles une dose d'azote ammoniacal supérieure à 7 kg d'azote par tonne de paille sèche.

C. — Comparaison de la paille avec des substances plus simples : amidon, glucose.

Nous avons réalisé les mêmes essais avec des substances moins complexes que la paille. Nous utilisons alors des matières hydrocarbonées simples : amidon, et glucose (graphiques 5 et 6).

Tableau 12

Influence des quantités croissantes d'amidon sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Grammes d'amidon ajoutés au mélange 100 g terre + 100 mg (NH_4)	0,5	1	2	4	6
Mg d'azote minéral N $(NH_3 + NO_3)$ retrouvés	78,8	68,7	59,4	48,8	34,7
Pourcentage d'azote minéral consommé par les microorganismes	9	19,1	28,4	39	53,1
Azote consommé pour 100 d'amidon ajouté	1,8	1,91	1,42	0,97	0,88

Essais ayant séjourné 10 jours à 28°,

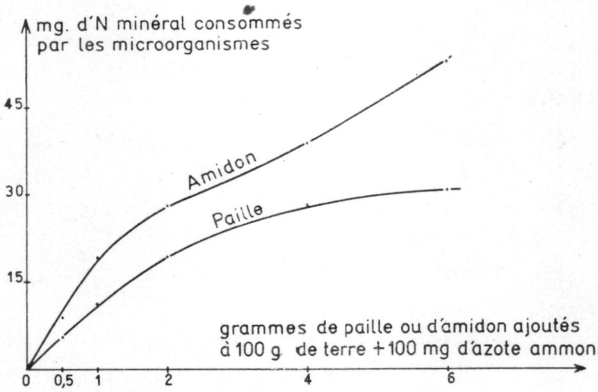
TABLEAU 13

Influence des doses variables d'azote ammoniacal sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes, lors d'un apport d'amidon.

Mg d'N (NH_4) ajoutés au mélange 100g terre + 2 g amidon	25	50	100	150	200
Pourcentage d'azote minéral consommé par les microorganismes	63,2	39,4	25,5	23,3	16,7

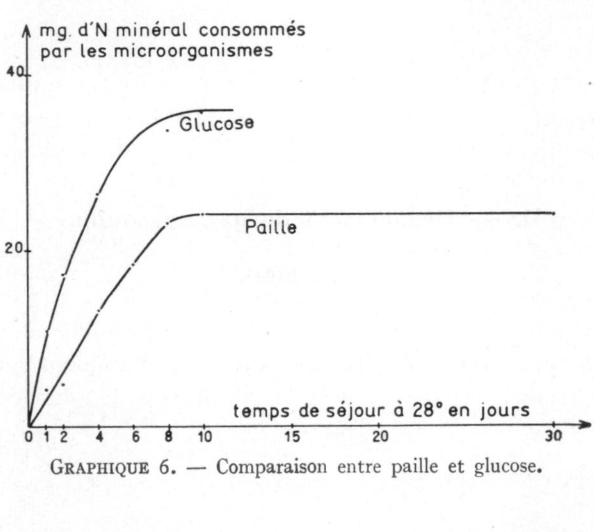
Résultats obtenus pour des essais ayant séjourné 10 jours à 28°.

La consommation d'azote minéral par les microorganismes est beaucoup plus importante dans le cas de l'amidon que dans celui de la paille (tableaux 10 et 12).



GRAPHIQUE 5. — Comparaison entre paille et amidon

Voisine de 1,2 p. 100 pour la paille, elle atteint ici 1,8 p. 100. L'amidon (44 p. 100 de C) se décompose dans le sol très rapidement et entièrement



GRAPHIQUE 6. — Comparaison entre paille et glucose.

tandis que la paille [1] (40 p. 100 de C), de nature plus complexe, et formée de substances plus résistantes, est attaquée plus lentement et d'une façon incomplète, si bien que les besoins en azote des microorganismes sont moins importants.

La même expérience est faite avec le glucose, glucide simple, qui se décompose encore plus rapidement que l'amidon.

Chimiquement, nous avons suivi la disparition du glucose en présence et en absence d'azote ammoniacal.

Pour le dosage du glucose, les mélanges (terre + glucose + avec ou sans azote ammoniacal) ont été agités avec 500 cc d'eau, et des dosages par la méthode de BERTRAND ont été faits sur les filtrats.

Du glucose ajouté dans un sol disparaît relativement vite, et sa disparition est encore plus rapide en présence d'azote ammoniacal (tableau 14). Il existe un parallélisme étroit entre la consommation de l'azote minéral et la disparition du glucose. La consommation d'azote minéral cesse quand les microorganismes n'ont plus d'aliment carboné à leur disposition.

TABLEAU 14

Disparition du glucose et consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Temps de séjour des essais à l'étuve à 28°	Pourcentage de glucose disparu		Mg d'N minéral consommés par les microorganismes
	en absence d'azote ammoniacal	en présence d'azote ammoniacal	
1 jour	6,8	17,6	10,8
2 jours	13,4	38,1	17,1
4 jours	26	97,1	26,5
6 jours	44,5	100	36,3
8 jours	82	100	33,5
10 jours	96,1	100	35,6

Les essais comprennent 100 g terre + 2 g glucose en présence ou non de 100 mg d'azote ammoniacal.

Par contre, dans le cas de la paille qui se décompose plus lentement, la consommation d'azote minéral cesse bien que la décomposition se poursuive, comme l'analyseur de gaz nous a permis de le constater.

D. — Dégagement de gaz carbonique.

1° Sa mesure.

Les dégagements de gaz carbonique nous permettent de connaître l'activité globale de la microflore du sol à chaque moment considéré. Bien que le gaz carbonique mesuré soit la résultante de plusieurs processus

(1) Composition de la paille en général : 40% de carbone, 40,6 % de pentosanes, 34,3 % de cellulose, 13,1 % de lignine.

dont les deux principaux sont la libération de CO_2 provenant de la décomposition des matières organiques et la réutilisation d'une partie de ce CO_2 pour des synthèses, il reproduit cependant l'activité microbienne globale du sol d'une manière assez fidèle. L'existence d'une relation entre la quantité de CO_2 dégagée par un sol et l'activité biologique de ce dernier, a d'ailleurs été mise en évidence par les travaux de nombreux chercheurs, notamment par ceux de WAKSMAN et STARKEY, SMITH, BROWN et MILLAR, APPLEYARD et RUSSELL... (18).

L'addition de paille dans un sol stimule l'activité de certains microorganismes qui trouvent dans cette matière organique facilement fermentescible une source d'énergie, et les dégagements gazeux y sont environ trois fois plus importants qu'en absence de paille, ainsi que le témoignent le tableau 15 et le graphique 7.

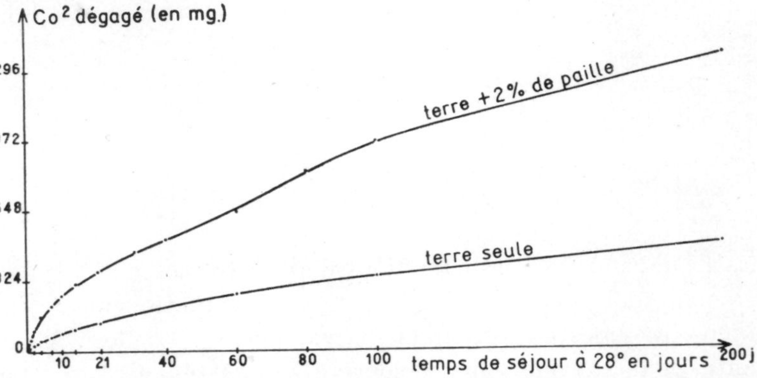
TABLEAU 15

Mesures de gaz carbonique dégagé en présence et absence de paille.

Temps de séjour des essais à 28°	1 jour	2	4	7	10	14	21	31	40	60	80	100	199
100 g terre.	22,7	58,3	90,7	123,1	162,0	197,6	265,7	346,7	405	518,4	602,6	673,9	978,5
100 g terre + 2 g paille.	126,6	207,3	320,7	430,9	515,1	618,8	754,9	920,1	1033,5	1279,8	1671,8	1924,5	2724,8

Chiffres cumulatifs exprimés en mg de CO_2

La différence des quantités de gaz carbonique dégagé dans l'essai avec paille et celui sans paille permet d'évaluer l'activité des microor-



GRAPHIQUE 7. — Dégagement de gaz carbonique. après un apport de 2 p. 100 de paille (résultats cumulatifs).

ganismes spécialisés dans l'attaque de la paille ; nous supposons alors identiques les autres phénomènes microbiens qui ont lieu dans le sol en

absence et en présence de paille. Il faut mentionner que nous n'avons pas à craindre de fermentations puisque nous sommes en milieu aérobie.

2° Influence des apports d'azote ammoniacal sur les dégagements de CO_2.

D'autres mesures de gaz carbonique dégagé ont été faites en présence de plusieurs doses d'azote ammoniacal, doses que nous avions prévues d'utiliser pour faire l'étude microbiologique : c'étaient notamment les doses A, B, C, D, qui correspondent respectivement à 23,3 ; 31 ; 38,7 et 46,4 mg d'azote ammoniacal pour 100 g de terre. Ces doses sont assez voisines, mais il s'agit simplement d'expériences préliminaires.

Ainsi que nous l'avons déjà vu, l'addition de paille à un sol entraîne une augmentation de l'activité des microorganismes spécialisés dans l'attaque de la paille et cette augmentation est accrue par un apport d'azote ammoniacal (tableau 16). Cependant, quelle que soit la dose d'azote ammoniacal ajoutée, les dégagements gazeux ne varient pas, ce qui tend à prouver que même la dose d'azote la plus faible, A, est suffisante pour assurer la décomposition de la paille. Les microorganismes ont assez d'azote à leur disposition. Le dégagement de CO_2 est alors limité dans cette expérience, non pas, par l'azote mais par la paille ; en effet, nous avions déjà constaté que pour une certaine dose d'azote, le dégagement gazeux est d'autant plus important qu'il y a plus de paille à la disposition des microorganismes.

TABLEAU 16

Influence de l'azote ammoniacal sur les dégagements de CO_2.

Durée de séjour des essais à 28°	1 jour	2	4	7	10	14	21	31
0 mg d'N ammoniacal......	93,9	149	236,5	307,8	353,1	421,2	489,2	573,5
23,3 mg —	77,7	149	353,1	677,1	946,1	1 208,5	1 487,1	1 675,1
31 mg —	81,0	152,3	356,4	683,6	959	1 231,2	1 496,9	1 675,1
38,7 mg —	77,7	136,1	353,1	690,1	965,5	1 221,5	1 396,4	1 519,5
46,4 mg —	81,0	139,3	346,7	670,7	942,8	1 221,5	1 389,9	1 519,5

Chiffres cumulatifs obtenus pour 100 g terre + 2 g paille ± azote ammoniacal et exprimés en mg de CO_2.

En examinant les consommations d'azote par les microorganismes, nous remarquons qu'elles non plus, ne varient pratiquement pas avec les différentes doses d'azote ammoniacal ajoutées. La dose A est déjà suffisante pour subvenir aux besoins des microorganismes attaquant la paille et l'azote ajouté en supplément n'est pas utilisé. Nous devions d'ailleurs nous attendre à cette uniformité des résultats, puisque d'après ANDERSON (19), le maximum de croissance des microorganismes attaquant le cellulose, se produit quand le rapport N/cellulose est voisin de

1/35, or déjà avec la dose d'azote la plus faible A, nous avons un rapport de l'ordre de 1/20.

Nous avons alors recommencé nos mesures de dégagement de CO_2 pour les deux doses extrêmes A et D et pour deux doses beaucoup plus faibles 5 et 10 mg, afin d'obtenir des résultats moins uniformes (tableau 17).

TABLEAU 17

Influence de l'azote ammoniacal sur les dégagements de CO_2

	Entre jour 0 et 1 jour	Entre 1 et 2 jours	Entre 2 et 4 jours	Entre 4 et 7 jours	Entre 7 et 10 jours	Entre 10 et 14 jours	Entre 14 et 21 jours
0 mg N ammoniacal	71,3	55,1	30,8	18,10	12,9	10,3	8,4
5 mg »	84,2	81	45,3	48,60	29,10	22,7	16,2
10 mg »	77,7	74,5	98,5	71,3	36,8	28,5	11,6
A (23,3 mg N ammoniacal)	77,7	71,3	68,0	107,5	90,7	65,4	39,5
D (46,4 mg »)	81,0	58,3	103,7	107,5	89,4	92,6	24,0

	Entre 21 et 30 jours	Entre 30 et 40 jours	Entre 40 et 60 jours	Entre 60 et 80 jours	Entre 80 et 100 jours	Entre 100 et 200 jours	Entre 200 et 300 jours
0 mg d'N ammoniacal	7,45	9,70	11,30	7,70	6,50	5,20	1,30
5 mg	6,50	6,15	4,20	5,80	6,50	6,90	0,65
10 mg	23,30	14,90	13,30	12,30	11	6,50	1,30
23,3 mg	18,80	12,30	9,70	6,90	4,50	2,60	—
46,4 mg	12,90	7,70	6,90	7,10	7,10	2,60	1,30

Dégagements journaliers obtenus pour (100 g terre + 2 g paille ± azote ammoniacal) et exprimés en mg de CO_2

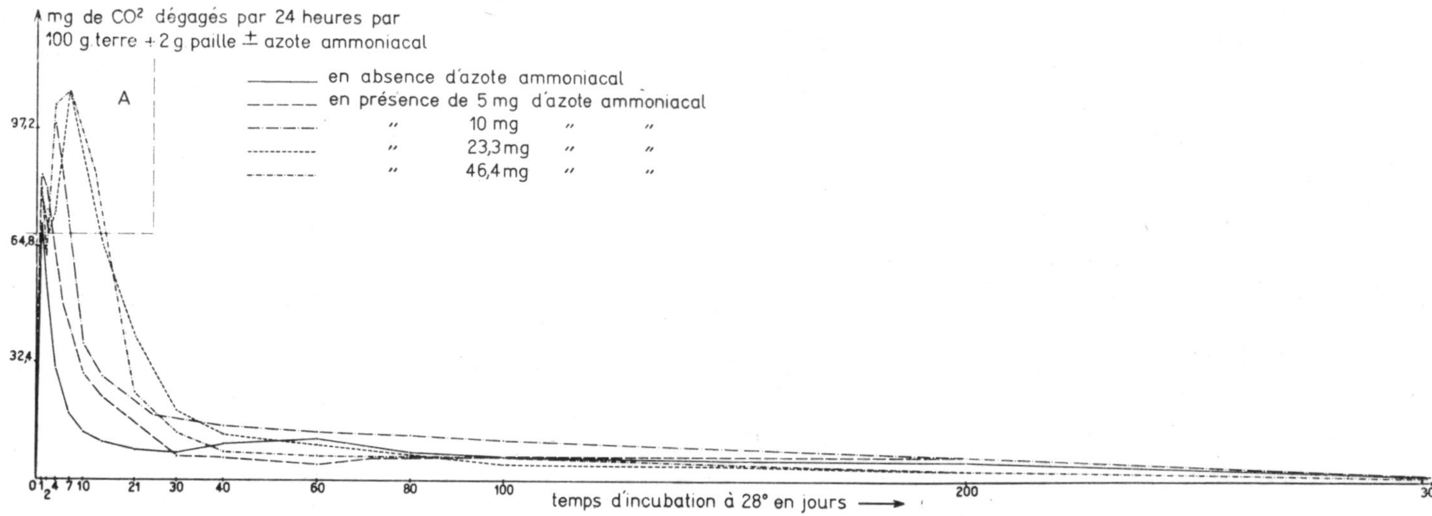
Le réveil des microorganismes du sol est immédiat. Dès le premier jour de l'enfouissement des pailles, même en absence d'un apport d'azote minéral, leur activité est stimulée.

Pour l'essai sans azote et pour la dose d'azote la plus faible (5 mg), le dégagement maximum de CO_2 a lieu dès les premiers jours, puis progressivement le CO_2 dégagé décroit (graphique 8),

Pour les autres doses d'azote (10; 23,3 et 46,4 mg), l'activité maxima est un peu décalée et se situe entre le 4^e et le 7^e jour, ensuite elle diminue lentement au cours du temps.

Nous retrouvons là des faits déja observés par de nombreux auteurs (20 ; 21) à savoir que l'attaque des matières organiques enfouies est très rapide et que la période de décomposition maxima se situe dans les premiers jours qui suivent l'addition de ces matières au sol.

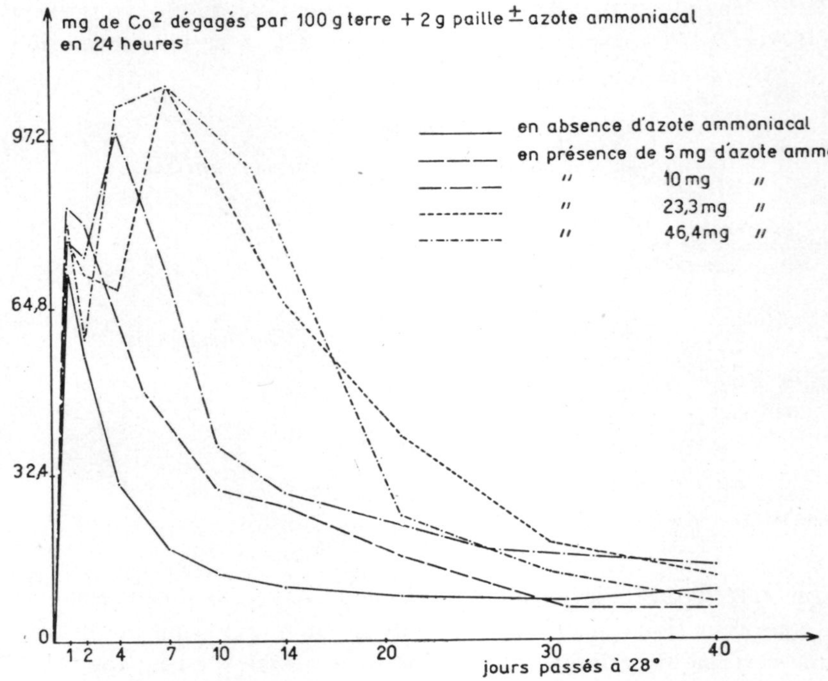
Dans la première partie de cette expérience, jusque vers la 20^e jour, le dégagement gazeux est d'autant plus intense que les microorganismes ont plus d'azote à leur disposition, mais ceci est vrai seulement jusqu'à une certaine dose d'azote que nous avons vue être voisine de la dose A (23,3 mg).



Graphique 8. — Dégagement journalier de gaz carbonique après un enfouissement de 2 p. 100 de paille.

Ainsi, pour des doses inférieures à cette dernière, l'activité des microorganismes dépend de la quantité d'azote ammoniacal présente dans le milieu.

Ensuite après 20 jours, les dégagements de CO_2 continuent à décroître lentement pour tous les essais et peu à peu, les différences ont tendance à s'estomper. Il semble toutefois, que les dégagements les plus faibles correspondent dans cette seconde partie aux doses d'azote ammoniacal les plus élevées, mais les chiffres trouvés sont peu différents les uns des autres. MILLAR, SMITH et BROWN (22), qui, par des mesures de



GRAPHIQUE 8 *bis*. — Agrandissement du graphique 8.

CO^2 ont suivi la décomposition dans un sol sableux de différentes matières organiques, ont remarqué qu'au départ, ce sont les matériaux les plus riches en azote qui dégagent le plus de gaz carbonique et par suite se décomposent le plus vite et qu'après 10 jours, c'est l'inverse qui se produit. Dans nos expériences, il ne s'agit pas de différentes matières organiques plus ou moins riches en azote, mais d'une seule à laquelle on fournit plus ou moins d'azote ammoniacal pour faciliter sa décomposition. On est ainsi amené à étudier un problème voisin de celui des auteurs américains. Lorsque l'azote est en quantité suffisante (23,3 et 46,4 mg), la décomposition est intense ; les microorganismes, vraisemblablement plus nombreux, mais surtout plus actifs, attaquent fortement la paille les

dix premiers jours, puis leur activité décroît par suite d'une disparition en quantité notable de substances énergétiques. Par contre, quand l'azote est en quantité limitée, l'activité des microorganismes est moins explosive dès le début et l'attaque de la paille est plus continue. Les microorganismes sont dans ce cas moins prodigues de substances énergétiques et en ont plus longtemps à leur disposition.

3° Relation entre le dégagement de CO_2 et la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Parallèlement au dégagement de gaz carbonique, nous avons suivi pendant 8 mois, la consommation d'azote minéral et sa transformation en azote organique microbien (tableau 18).

TABLEAU 18

Consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Mg d'azote ammoniacal ajoutés à 100 g terre ± 2 g paille	5 mg	10	23,3	46,4
au jour 0	0	0,4	0	0
au jour 2	1,9	2,25	1,4	0,5
au jour 4	5,1	6,30	3,5	4,9
au jour 7	4,55	8,60	12,65	13,25
au jour 10	4,05	8,40	12,95	14,0
au jour 14	4,75	8,75	18,20	18,20
au jour 1 mois	4,55	8,20	19,20	19,80
au jour 2 mois	6,30	11,75	20,65	18,40
au jour 4 mois	8,75	11,9	16,8	19,60
au jour 8 mois	7,70	7,9	15,55	14,90

Résultats exprimés en mg d'azote minéral.

Nous retrouvons là les résultats déjà énoncés précédemment à savoir que la consommation d'azote minéral par les microorganismes croît jusqu'à une certaine dose limite (dose A dans nos essais = 23,3 mg). Au-

TABLEAU 19

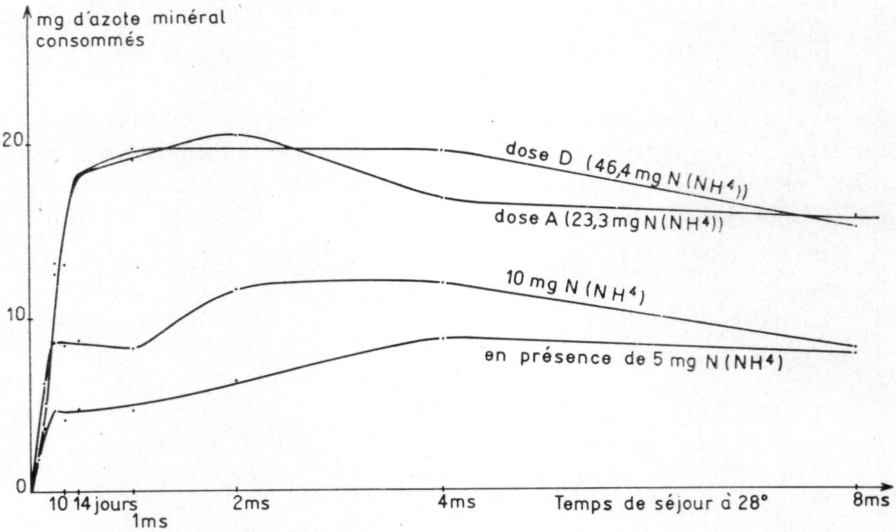
Pourcentage d'azote minéral consommé, évalué par rapport à l'azote minéral ajouté.

Mg d'azote ammoniacal ajoutés à 100 g terre + 2 g paille	5	10	23,3	46,4
au jour 0	0	4	0	0
au jour 2	38	22,5	6	1,1
au jour 4	100	63	15	7,9
au jour 7	91	86	54,2	29,1
au jour 10	81	84	55,5	30,8
au jour 14	95	87,5	78,1	40
au jour 1 mois	91	82	82,4	43,6
au jour 2 mois	100	100	88,6	40,5
au jour 4 mois	100	100	72,1	42,2
au jour 8 mois	100	100	66,7	32,1

delà, l'azote ajouté n'est pas utilisé. Cette consommation est très rapide et nous atteignons très vite une utilisation de 100 p. 100 pour les faibles doses (tableau 19).

Lorsque les microorganismes ont suffisamment d'azote minéral à leur disposition (doses A et D), leur consommation maxima a lieu au bout d'un mois environ. Pour les autres doses, cette consommation continue à croître dans le temps (graphique 9). En effet, les conditions de température et d'humidité étant favorables, une partie de l'azote organique de la terre se minéralise et est immédiatement utilisée par les microorganismes, dont les besoins n'étaient pas entièrement satisfaits.

Pour les doses fortes, il se produit un arrêt de la consommation, ainsi que nous l'avons déjà constaté. Par contre, la décomposition de



GRAPHIQUE 9. — Consommation de l'azote minéral en présence de 2 p. 100 de paille.

la paille se poursuit comme en témoignent les dégagements de CO_2. Le même azote est utilisé par des vagues successives de microorganismes, il passe alternativement par les formes minérale et organique au cours de la décomposition de la paille et il subit ainsi la destinée de tous les éléments nutritifs, qui, dans le sol, peuvent être utilisés indéfiniment par les microorganismes. Par contre, les aliments énergétiques ont un sort tout à fait différent, car, une fois que l'énergie est dissipée sous forme de CO_2 par un organisme, elle est perdue définitivement pour tous les autres.

Dans les derniers dosages d'azote, faits après 8 mois d'enfouissement, il apparaît une diminution de la consommation d'azote, quelle que soit la dose d'azote ammoniacal ajoutée au départ. Il est vrai qu'étant

donné les conditions favorables de température et d'humidité dans lesquelles nous opérons, l'attaque de la paille est alors déjà bien avancée et une partie de l'azote immobilisé au départ pour la décomposition de celle-ci commence à se minéraliser ; ceci a pour effet d'entraîner une diminution de l'azote immobilisé par les microorganismes. Il est vraisemblable que si nous avions poursuivi nos expériences plus longtemps, nous aurions trouvé une minéralisation progressive de cet azote et nous aurions rejoint les résultats que nous indiquons ultérieurement : à savoir que l'azote immobilisé par l'enfouissement des pailles n'est pas perdu et qu'il devient progressivement utilisable par les plantes dans le futur.

E. — Évolution du carbone de la paille.

1° Sa mesure.

Il n'existe pas de relation entre le CO_2 dégagé par les microorganismes et mesuré à l'analyseur et le carbone disparu dosé par oxydation. Il est vrai que les conditions d'expérience ne sont pas identiques dans les deux cas. Dans les béchers de 250 cc, l'aération de la terre est continuelle et les échanges gazeux avec l'atmosphère sont plus importants, tandis que dans les erlenmeyers, l'atmosphère devient, sans doute, à certains moments trop riche en CO_2, ce qui provoquerait un arrêt de la décomposition, celle-ci ne reprenant qu'après l'aération du milieu.

La méthode ANNE (11) nous a permis de suivre l'évolution du carbone de la paille au cours du temps.

TABLEAU 20

Evolution du carbone dans les essais sans paille. Pourcentage de carbone dans les prises d'essais.

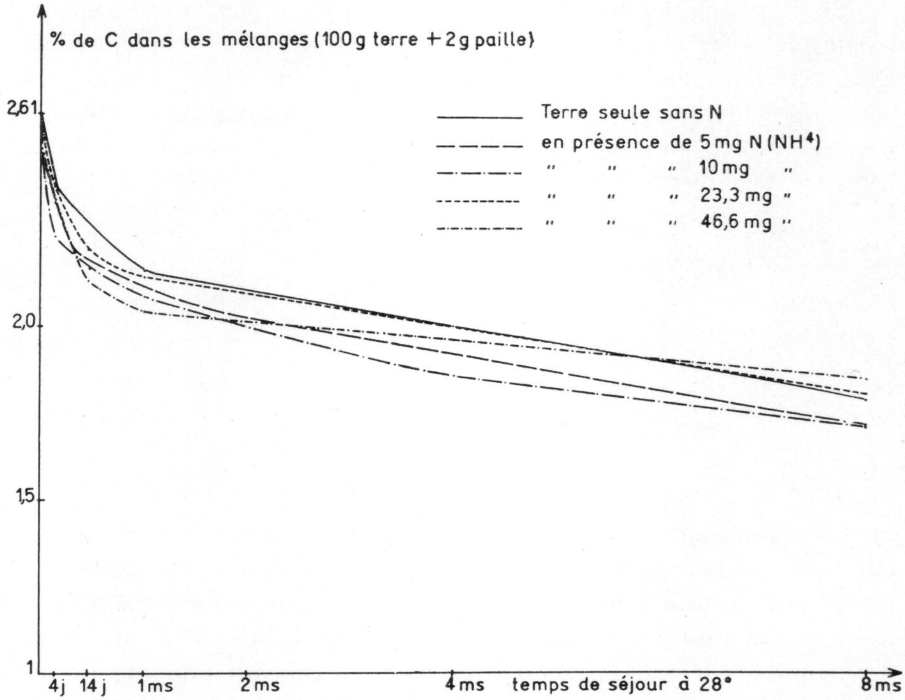
Mg d'azote ammoniacal ajoutés à 100 g terre	0	5	10	23,3	46,6
Au jour 0	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81
Au 8e mois	1,77	1,68	1,83	1,8	1,76

TABLEAU 21

Evolution du carbone dans les essais avec paille. Pourcentage de carbone dans les prises d'essais.

Mg d'azote ammoniacal ajoutés à 100 g terre + 2 g paille	0	5	10	23,3	46,4
Au jour 0	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61
Au 4e jour	2,41	2,20	2,25	2,42	2,35
Au 14e jour	2,32	2,22	2,16	2,21	2,12
A 1 mois	2,16	1,95	2,08	2,14	2,04
A 4 mois	2,0	2,05	1,86	1,77	1,98
A 8 mois	1,79	1,72	1,71	1,81	1,86

La majeure partie des pertes en carbone se produit dans les premiers mois (graphique 10) ; ce sont alors les matières facilement décomposables qui disparaissent et leur décomposition est très légèrement plus rapide en présence d'azote minéral, puis ensuite l'attaque de la paille se poursuit plus lentement et finalement après 8 mois, on arrive au même taux de carbone, aux erreurs d'expérience près, que ce soit en présence ou en absence de paille, en présence ou en absence d'azote ammoniacal. Dans nos essais, la paille ne laisserait pratiquement pas de résidus carbonés,



GRAPHIQUE 10. — Disparition du carbone au cours du temps (essais avec paille).

ainsi qu'en témoignent les tableaux 20 et 21 ; il est vrai que les conditions sont favorables à une décomposition plutôt qu'à une accumulation.

2° Essais de fractionnement de la matière organique.

a) PAR L'EMPLOI DE RÉACTIFS CHIMIQUES.

Nous avons essayé de fractionner la matière organique, afin de suivre au cours du temps l'évolution de certains composés.

Après une extraction au sulfate de potassium N/10, nous avons traité le résidu avec du pyrophosphate de sodium neutre M/10, qui solu-

bilise les acides humiques et fulviques. (1) Les acides humiques se différencient alors des acides fulviques par leur insolubilisation dans l'acide sulfurique à 20 p. 100 (23).

Le résidu des deux premières extractions, traité avec de l'acide sulfurique N/2 pendant deux heures au réfrigérant ascendant, libère, ce qu'on appellera des hémicelluloses. Il est en effet probable que la majeure partie de ce qui est extrait est constitué par des hémicelluloses. Pour chacune de ces fractions, le carbone est évalué suivant la méthode ANNE (11).

En huit mois, les deux premières fractions n'ont pas varié. Là encore, la constance des taux d'acides humiques et fulviques, s'explique facilement puisque les conditions d'expérience (température, humidité et aération) sont favorables à la minéralisation plutôt qu'à l'accumulation de la substance noire. Les extractions des matières humiques à la soude, confirment d'ailleurs cette absence d'humification.

TABLEAU 22

Evolution des hémicelluloses dans les essais sans paille.

Mg d'azote ammoniacal ajoutés à 100 g terre.	0	5	10	23,3	46,6
Au jour 0	407	408	410	386	390
Au 8e mois	417	407	383	362	368

Résultats exprimés en mg de C.

Les hemicelluloses, comprenant les pentosanes et les hexosanes, entrent pour une part importante dans la constitution des pailles. Du fait de leur nature complexe, elles se dégradent progressivement. Leur décomposition est d'autant plus rapide, tout au moins au début de l'enfouissement, que les apports d'azote ammoniacal sont plus importants, ainsi que l'indiquent le tableau 23 et les expériences de GERRETSEN et WAKSMAN (24).

TABLEAU 23

Evolution des hémicelluloses dans les essais avec paille.

Mg d'azote ammoniacal ajoutés à 100 g terre + 2 g paille	0	5	10	23,3	46,6
Au jour 0	630	614	581	594	579
Au jour 10	—	587	589	576	556
A 1 mois	589	576	558	543	558
A 2 mois	590	580	536	501	490
A 4 mois	510	500	482	510	495
A 8 mois	396	449	404	412	437

Résultats exprimés en mg de C.

(1) Ce sont avec l'humine les constituants essentiels de l'humus.

Deux mois après l'enfouissement, la dégradation des hémicelluloses atteint déjà environ 40 p. 100 pour les deux doses d'azote les plus fortes ; elle se poursuit dans le temps et après 8 mois, elle arrive à être presque totale dans certains cas. Il a d'ailleurs déjà été signalé une disparition de 99 p. 100 des hémicelluloses en huit mois, dans un fumier de paille bien fermenté (25).

Cette étude sur la disparition des hémicelluloses ne nous apporte pas de renseignements complémentaires. Elle confirme uniquement ce que nous avions déjà trouvé. En huit mois, il disparaît à peu près un tiers du carbone total et un tiers des hémicelluloses. Nous nous retrouvons alors pour les essais avec paille avec un taux de carbone et d'hémicelluloses voisin de celui des essais sans paille. (1) Dans nos conditions d'expérience, tout le carbone de la paille et par conséquent les hémicelluloses ont pratiquement disparu en huit mois. Nous arrivons à des résultats identiques avec la méthode de fractionnement des matières organiques par différence de densité (26).

b) SÉPARATION PAR DIFFÉRENCE DE DENSITÉ.

Un poids connu des essais est agité dans un mélange de tétrachlorure de carbone et de bromoforme de densité = 2. La fraction légère, surnageante, est constituée de matières organiques, tandis que dans la fraction lourde passent les constituants minéraux du sol qui entraînent parfois un peu de matière organique.

TABLEAU 24

Variation du poids de la fraction légère au cours du temps et en fonction des différentes doses d'azote ammoniacal.

	Mg d'azote ammoniacal ajoutés à 100 g terre	En absence de paille.	En présence de 2% de paille.
Au jour 0	0	56,5	259
Après 41 jours à 28°	0	23	192
	5	30	149
	10	23	90
	23,3	24	64
	46,4	23	53
Après 260 jours à 28°	0	17,5	22
	5	8,5	15
	10	8,5	14
	23,3	11	16
	46,4	8	22

Résultats exprimés en mg, et obtenus pour 1/10 des mélanges (100 g de terre ± 2 g paille ± azote ammoniacal).

(1) Il faut remarquer que le taux d'hémicelluloses de la terre seule est élevé.

La fraction légère diminue au cours du temps (tableau 24), et d'autant plus rapidement que les apports d'azote ammoniacal dans le milieu ont été plus importants. Ceci est d'ailleurs très net pour les essais avec paille. Par contre, en absence de paille, l'azote ammoniacal n'intervient pas. Finalement, après un peu plus de 8 mois, les différences entre les essais s'atténuent et nous arrivons à des chiffres voisins, que ce soit en présence ou en absence de paille, en présence ou en absence d'azote ammoniacal. La presque totalité de la matière organique de la paille a disparu.

En résumé, nos conditions d'expérience sont favorables à la dégradation de la paille et en huit mois, nous constatons une disparition quasi totale du carbone de la paille enfouie. L'apport d'azote ammoniacal accélère cette disparition au début de l'enfouissement, mais en fin d'expérience, son action n'est plus visible.

F. — Minéralisation de l'azote transformé en azote organique par les microorganismes.

Une fois la décomposition de la paille bien avancée, l'azote immobilisé au départ, se minéralise peu à peu et devient utilisable par les plantes. L'azote, ainsi ajouté lors de l'enfouissement des pailles pour éviter l'effet dépressif sur les cultures, n'est pas perdu, mais simplement mis en réserve pendant un certain temps, ainsi que le démontre l'expérience suivante :

Les mélanges (100 g terre ± 2 g paille + 24 mg d'azote ammoniacal) sont laissés pendant un mois et demi à l'étuve à 28°. En présence de paille, les microorganismes consomment pour leurs besoins 20 mg d'azote. Nous suivons alors la minéralisation de cet azote dans le temps par la méthode DROUINEAU (7).

TABLEAU 25

Minéralisation de l'azote consommé par les microorganismes.

	Mg d'azote minéralisés dans essais sans paille	Mg d'azote minéralisés dans essais avec paille	Mg d'azote minéralisés provenant de l'azote consommé
Au jour 0	1,10	4	2,9
Après 1 mois	1,20	6,3	5,1
Après 2 mois	0,50	8,5	8,0
Après 3 mois	1,10	11,7	10,6
Après 6 mois	2,10	19,3	17,20

Après un passage de six mois à 28°, plus des trois quarts de l'azote immobilisé pour la décomposition de la paille, se sont minéralisés et deviennent utilisables par les plantes.

Le même phénomène a été observé dans les champs par LEFEVRE et M[me] BLANC-AICARD (27) qui pensent qu'en été, sous climat méditerranéen, il y aurait restitution d'une grande partie de l'azote bloqué pour la décomposition des pailles. Ils signalent en effet à ce sujet que les parcelles « paille » se sont maintenues trois ans après le dernier enfouissement à une teneur en azote total supérieure de 0,2 p. 100 à celle des témoins.

Les arrière-actions positives, obtenues là où il y a eu un enfouissement de paille les années précédentes, peuvent s'expliquer de la même façon.

Ainsi à l'O. N. I. A., SOUBIES, GADET et MAURY (17) ont comparé le fumier artificiel et la paille enfouie telle quelle (en quantité équivalente à celle exigée pour la fabrication du fumier artificiel) (tableau 26).

La paille (20 tonnes à l'hectare) a reçu à l'enfouissement la quantité d'azote employée pour la préparation du fumier artificiel, c'est-à-dire 7 kg par tonne.

Les mêmes quantités de potassium et de phosphore ont été ajoutées dans toutes les parcelles.

TABLEAU 26

Résultats des expériences de l'O. N. I. A. Rendements comparatifs.

	Rendement de la parcelle à engrais minéraux = 100	Parcelle « fumier »	Parcelle « paille »
Année 1948	100	84,7	82
Année 1949	100	87,8	92
Année 1950	100	90	102

La paille, d'abord inférieure au fumier la première année, lui est égale ensuite, et le dépasse en troisième année. La paille accumulerait de l'azote qui serait perdu par le fumier artificiel (par drainage, volatilisation...) et elle serait capable de le rendre plus tard, ce qui expliquerait sa supériorité.

G. — Importance des facteurs physiques sur l'enfouissement des pailles.

Les microorganismes jouant un rôle très important dans la décomposition des pailles enfouies, il est tout à fait logique d'étudier l'influence des divers facteurs physiques sur leur activité.

1° Rôle de l'humidité.

Les mélanges (100 g terre $\pm$ 2 g paille + 100 mg azote ammoniacal) sont amenés à différents degrés d'humidité, compte tenu de l'humidité initiale de la terre séchée à l'air dont les colloïdes retiennent 2,4 p. 100 d'eau liée.

On ne peut pas descendre au-dessous de 12,4 p. 100 d'humidité sinon les mélanges ne sont plus humectés d'une façon homogène. Il faut un certain taux d'humidité pour assurer le développement des microorganismes et permettre leur propagation.

TABLEAU 27

Influence de l'humidité de la terre sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Pourcentage d'eau dans les mélanges	12,4	17,4	22,4	27,4	32,4	42,4	52,4
Mg d'azote minéral consommés par les micro-organismes	19	22,4	22,4	23,8	24,2	16,8	14,4
Mg d'azote nitrique formés	0,25	3,45	7,70	5,25	1,7	0	0

Résultats obtenus après 10 jours dans l'étuve à 28°.

La consommation maxima d'azote minéral par les microorganismes se produit aux environs de 30 p. 100 d'humidité. Au-dessus, elle diminue, car le milieu devient asphyxiant et les microorganismes se développent moins bien.

La quantité d'azote nitrique formée varie avec le degré d'humidité et présente un optimum pour 22 p. 100 d'eau, taux voisin de la moitié de la capacité de saturation de la terre (en arrosant sur filtre 100 g de terre avec 100 cc d'eau, environ 46 cc de liquide sont retenus). Nous retrouvons, là, les résultats de TRAAEN qui avait obtenu un optimum de nitrification pour une teneur en eau voisine de la demi-saturation (28). Un excès d'eau nuit à la bonne circulation de l'air et par suite aux nitrificateurs qui sont des germes essentiellement aérobies.

2° Influence de l'aération.

Les phénomènes microbiens sont influencés par la constitution physique et la structure lacunaire des sols.

Nous avons alors essayé de modifier l'aération de la terre d'expérience, soit en lui incorporant du sable, soit en l'enrichissant en argile :

APPORT DE SABLE.

Des quantités croissantes de sable d'une certaine grosseur (la dimension de ces grains est comprise entre 500 et 1 000 μ) sont ajoutées aux mélanges (100 g terre ± 2 g paille + 100 mg N ammoniacal) (tableau 28).

L'aération, en augmentant les échanges gazeux, agit favorablement sur l'activité microbienne.

TABLEAU 28

Influence des apports de sable sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Grammes de sable ajoutés aux mélanges	15	30	50	75	100
Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes..................	22,4	22,4	22,1	27	27

Résultats obtenus après 10 jours à 28°.

APPORT D'ARGILE.

Dans une seconde expérience, l'aération de la terre est modifiée par des additions d'argile. Pour cela, nous partons d'une terre sableuse de Sologne, pH 6,6, pauvre en argile (6,8 p. 100) et nous lui ajoutons des quantités croissantes d'argile calcique extraite du sol de Choisy, pH 7,1 (tableau 29).

TABLEAU 29

Influence de l'argile sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Grammes d'argile ajoutés aux mélanges..........	0	1,5	3,5	6	9	11
Mg d'azote minéral consommés par les micro-organismes...............	11,9	10,95	14,35	13,65	18,55	18,55

Les essais portent sur des mélanges comprenant 100 g terre ± 2 g paille + 100 mg N ammoniacal ± argile, et laissés 10 jours à 28°.

Une troisième expérience est faite avec du sable de Fontainebleau que nous enrichissons avec de l'argile calcique, pH 7,5. L'enrichissement est plus poussé que dans l'expérience précédente (tableau 30).

TABLEAU 30

(*complémentaire du tableau* 29).

Grammes d'argile ajoutés à 100 g sable ± 2 g paille + 100 mg N ammoniacal	0	5	15	30	45
Mg d'azote minéral consommés par les micro-organismes	6,3	5,6	10,85	5,95	3,5

Résultats obtenus après 10 jours d'étuve à 28°.

La consommation d'azote par les microorganismes croît jusqu'à un certain taux d'argile (tableau 30) puis ensuite elle diminue, car le milieu devient trop compact pour être favorable au développement microbien.

Cet accroissement du taux d'argile amène, peut être, également l'intervention d'autres facteurs (changement de pH du milieu, apport d'une nouvelle microflore) qui entraîneraient une modification de la consommation des microorganismes.

Toutes les expériences faites précédemment (influence de l'humidité, de l'aération, du taux d'argile) conduisent au même résultat : une bonne aération du sol favorise la consommation d'azote minéral par les microorganismes et par suite leur activité et augmente ainsi la décomposition des pailles. L'analyse microbiologique faite ultérieurement confirmera le rôle important joué principalement par les germes aérobies dans la dégradation des pailles enfouies.

3° Influence de la température.

Les mélanges (100 g terre ± 2 g paille + 100 mg d'azote ammoniacal) sont mis à des températures variables. Pour les essais laissés à 40° et 65°, l'humidité est vérifiée et corrigée tous les jours.

TABLEAU 31

Influence de la température sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Température	— 5°	+ 4°	+ 14°	+ 28°	+ 40°	+ 65°
Mg d'N minéral consommés par les microorganismes.	2	1,8	14,4	23,1	23,5	54,6
Mg d'N nitrique formés...	0,6	1,6	2,4	4,2	0	0

Résultats obtenus après 10 jours à 28°.

La nitrification, pratiquement nulle aux basses températures, présente son optimum vers 28° (tableau 31), puis cesse d'avoir lieu à 40° et 65° (29).

D'après des dosages faits par la méthode KJELDAHL sur les mélanges mis à 40 et 65°, les résultats obtenus pour ces températures sont à éliminer ; en effet une partie de l'azote ammoniacal ajouté se volatilise à l'état gazeux et ce départ est plus important en absence de paille.

Aux basses températures, les microorganismes attaquant la paille sont peu actifs. Leur activité croît avec la température et devient maxima pour 28° (tableau 31).

Des essais de longue durée sont entrepris dans l'étuve à 28° et parallèlement à la température extérieure. Les essais, mis en octobre dans une serre simplement couverte, sont soumis aux variations de la température extérieure pendant 4 mois.

L'humidité est maintenue dans les essais tout au long des expériences.

TABLEAU 32

Consommation d'azote minéral par les microorganismes à la température extérieure.

	Mg d'azote minéral retrouvés en absence de paille	Mg d'N minéral retrouvés en présence de paille	Mg d'N minéral consommés par les microorganismes
Après 1 heure	90,65	88,2	2,45
2 jours	90,65	87,5	3,15
5 jours	88,20	87,5	0,7
10 jours	84,35	81,2	3,15
20 jours	84	70	14
45 jours	83	67,2	15,8
90 jours	81,9	66,5	15,4
120 jours	78,05	63,35	14,7

Résultats obtenus avec des mélanges qni comprennent 100 g terre ± 2 g paille + 100 mg azote ammoniacal.

A la température extérieure, la consommation d'azote est plus lente. Ce qui est consommé en 8 jours à 28° (tableau 33) l'est en 20 jours à la température extérieure (tableau 32).

TABLEAU 33

Consommation d'azote minéral par les microorganismes, à l'étuve à 28°.

	Mg d'azote minéral retrouvés en absence de paille	Mg d'azote minéral retrouvés en présence de paille	Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes
Après 1 heure	90	90,3	0
1 jour	90,3	90	0,3
2 jours	90	86,8	3,2
5 jours	87,15	76,65	10.5
8 jours	87,5	73,5	14
10 jours	81,55	68,25	13,3
15 jours	82,95	68,95	14

Résultats obtenus avec des mélanges comprenant 100 g terre ± 2 g paille + 100 mg azote ammoniacal.

Cependant dans les deux cas, la consommation reste stationnaire après avoir atteint une valeur de 14,15 mg d'azote minéral. Nous avons déjà signalé cet arrêt de la consommation.

H. — Influence des facteurs chimiques.

1° Expérience sur sable.

Afin d'étudier l'influence des macro-éléments, potassium et phosphore, sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes, nous avons utilisé un sable dépourvu de tout élément nutritif (tableau 34).

Une humidité de 10 p. 100 suffit pour humecter les mélanges : 100 g sable ± paille + 100 mg d'N ammoniacal. Au-dessus de ce taux, le milieu deviendrait asphyxiant.

TABLEAU 34

Consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Grammes de paille ajoutés à 100 g sable + 100 mg N ammoniacal.........	0	0,5	1	2	4	6
Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes...............	0	1,3	2,5	6,4	11,6	18,1

Résultats obtenus après 10 jours à 28°.

Dans une seconde expérience, nous avons ajouté de l'extrait de terre afin de mieux ensemencer le milieu. Les chiffres obtenus (tableau 35) indiquent une consommation légèrement supérieure de l'azote minéral. Ceci serait dû à une augmentation du nombre de germes dans le milieu.

TABLEAU 35

Consommation d'azote minéral par les microorganismes en présence d'extrait de terre.

Grammes de paille ajoutés à 100 g sable + 100 mg azote ammonical.......	0	0,5	1	2	4	6
Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes	0	2,35	4,4	7,25	12,1	19,8

Résultats obtenus après 10 jours à 28°.

Cette deuxième expérience est complétée par un enrichissement du milieu en phosphore et potassium. Pour cela, nous ajoutons aux mélanges (100 g sable ± paille + 100 mg N (NH^3)), 50 mg de phosphate bicalcique et 50 mg de sulfate de potassium.

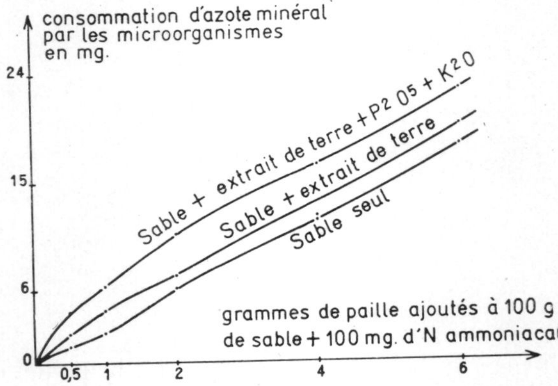
TABLEAU 36

Influence du phosphore et du potassium sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes, dans un sable.

Grammes de paille ajoutés aux mélanges.	0	0,5	1	2	4	6
Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes................................	0	4,3	6,4	10,75	16,5	22,65

Résultats obtenus après 10 jours d'étuve à 28°

L'addition de phosphates et de sels de potassium accroît la consommation d'azote minéral (tableau 36, graphique 11). C'est d'ailleurs tout à fait normal, car les microorganismes qui attaquent la paille dans le sol ont besoin pour leurs synthèses, non seulement de l'azote, mais aussi du phosphore et du potassium. Or, le sable utilisé pour l'expérience ne contient aucun élément nutritif, et il ne sert que de support.



GRAPHIQUE 11. — Influence du potassium et du phosphore sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

Les besoins des microorganismes n'apparaissent pas quand le sable est remplacé par de la terre. Ils existent cependant mais ils sont couverts intégralement par le phosphore st le potassium du sol.

2° **Expérience avec terre.**

La terre des Petits Closeaux, très carencée en acide phosphorique, est enrichie avec du phoshate monopotassique. Les résultats du tableau 37 indiquent une très légère différence entre la terre enrichie et la terre initiale. Pratiquement, il y aurait dans un sol même pauvre, suffisamment de phosphore pour satisfaire les besoins des microorganismes lors d'un enfouissement de paille.

TABLEAU 37

Influence d'un apport de phosphore dans la terre des Petits Closeaux sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

	Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes.
Terre initiale	13,5
Terre enrichie avec du phosphate	14,7

L'expérience porte sur 100 g terre ± 2 g paille + 100 mg azote ammoniacal et les résultats sont obtenus après un séjour de 10 jours à 28°

Des résultats identiques sont obtenus avec deux terres provenant des « 42 parcelles » (30). Elles sont semblables physiquement, mais différentes quant à leur teneur en P_2O_5 assimilable.

TABLEAU 38

Influence de la teneur en P_2O_5 assimilable sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

	pH	P_2O_5 assimilable	Mg d'N minéral consommés par les microorganismes.
Parcelle témoin	5,5	0,13 %	10,35
Parcelle à superphosphate enrichie depuis plus de 20 ans	5,7	0,54 %	11,70

Résultats obtenus après 10 jours à 28° pour les mélanges comprenant 100 g terre ± 2 g paille + 100 mg azote ammoniacal.

I. — Influence de la richesse en azote de la paille enfouie.

Des pailles, de teneur variable en azote, sont utilisées pour cette expérience.

TABLEAU 39

Influence de la teneur en azote des pailles sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

	Teneur en N en °/oo	Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes
Paille d'avoine	3,4	18,3
Paille de blé	3,65	17,5
Paille d'orge	7,2	14,2

Résultats obtenus après 10 jours à 28° pour des mélanges comprenant 100 g terre ± 2 g paille + 100 mg N ammoniacal.

La consommation d'azote minéral par les microorganismes diminue quand augmente le taux d'azote de la paille enfouie (tableau 39). Il semble qu'une partie de l'azote utilisé pour la décomposition provienne du produit incorporé : 4 mg sur 7 dans le cas de la paille d'orge. Ceci d'ailleurs suffit à expliquer les résultats variables obtenus au champ suivant la nature des pailles enfouies dans le sol. Les teneurs en azote des diverses pailles de céréales (orge, blé, avoine, seigle) allant de 0,3 à 0,8 p. 100, les écarts entre les teneurs extrêmes sont d'environ 5 kg d'azote par tonne de paille, ce qui représente une quantité importante comparativement à celle recommandée pour l'enfouissement des pailles (31).

J. — Influence du pH de la terre.

La décomposition des pailles dans le sol dépend de la réaction des sols. Un certain nombre d'expériences sont faites à ce sujet sur des échantillons de terres provenant des « 42 parcelles ». Ces terres, identiques quant à leur constitution physique, ont des pH différents, en raison des apports variables d'engrais faits tous les ans dans ces parcelles.

La consommation d'azote croît avec le pH (tableau 40). Les microorganismes commencent à être très actifs à partir de la neutralité Un milieu acide leur convient moins bien et la microflore qui s'y développe alors est peut-être tout à fait différente. Au-delà de 7,3 (tableau 40) leur consommation reste stationnaire. Les résultats concordent pour les deux dernières terres, cependant différentes physiquement.

TABLEAU 40

Influence du pH sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes,

	pH	Mg d'azote minéral consommés par les microorganismes.
Parcelle à phosphate monoammonique	4,5	9,8
Parcelle à K CL	6,0	11,5
Parcelle témoin	6,5	13,1
Parcelle à scories	7,3	20,8
Terre des Petits Closeaux	7,8	19,2
Terre de Grasse	8,0	20,4

Résultats obtenus pour des essais comprenant 100 g terre $\pm$ 2 g paille + 100 mg d'azote ammoniacal et ayant séjourné 10 jours à 28°.

D'autres expériences sont faites dans le but de savoir si l'activité des microorganismes est influencée par le pH ou par la présence du calcium dans les terres. Pour cela, nous traitons la terre de la parcelle à scories avec du chlorure de potassium normal. jusqu'à épuisement des ions Ca^{++}, puis avec du ClK N/100. Après un lavage de la terre avec de l'eau permutée jusqu'à disparition des ions Cl-, le pH s'élève jusqu'à 8,15. La consommation d'azote par les microorganismes pour cette nouvelle terre, après 10 jours d'étuve, atteint 20,2 mg, chiffre voisin de celui obtenu quand la terre contient du calcium.

Une seconde expérience, faite avec la terre de la parcelle à phosphate mono-ammonique conduit au même résultat. Au départ, le pH de cette terre est 4,5 et nous le modifions en ajoutant soit de la chaux en poudre, soit de la soude diluée ; le pH s'élève alors jusqu'à 6,8. Nous enfouissons alors de la paille dans ces deux terres modifiées.

La présence dans un sol des ions K^+, Ca^{++} ou Na^+, en quantité importante n'entraîne pas de modification de la consommation d'azote par les microorganismes (tableau 41). Seul, le pH du sol intervient comme le confirme encore l'expérience suivante.

TABLEAU 41

Influence du pH sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

	pH	Mg d'azote minéral consommés par les micro-organismes
Parcelle à phosphate mono-ammonique	4,5	9,8
Même terre, modifiée par un apport de CaO en poudre	6,8	20,1
Même terre, modifiée par une addition de soude diluée	6,8	20

Chiffres obtenus pour des mélanges ayant séjourné 10 jours à 28° et contenant 100 g terre ± 2 g paille + 100 mg N ammoniacal.

Un limon des environs d'Amiens, pH 6,7, est enrichi avec des quantités variables de carbonate de calcium. L'addition de 1 p. 100 de CO_3Ca à cette terre suffit pour déplacer le pH d'une quantité appréciable et le faire monter au-delà de la neutralité. Il s'ensuit une augmentation de l'activité des microorganismes et par suite un accroissement de leur consommation (tableau 42).

TABLEAU 42

Influence du pH sur la consommation d'azote minéral par les microorganismes.

	pH mesuré après 10 jours d'étuve à 28°	mg d'azote minéral consommés par les micro-organismes
Terre non enrichie	6,7	7,8
+ 1 % CO_3Ca	7,5	18,7
+ 2 % CO_3Ca	7,5	18,35
+ 3 % CO_3Ca	8	20,45
+ 4 % CO_3Ca	8,2	18
+ 5 % CO_3Ca	8,2	18
+ 15 % CO_3Ca	—	18,35
+ 30 % CO_3Ca	—	19,4
+ 50 % CO_3Ca	—	19,0

Chiffres obtenus pour des mélanges ayant séjourné 10 jours à 28° et contenant 100 g terre ± 2 g paille + 100 mg d'azote ammoniacal ± CO_3Ca.

Des additions supplémentaires de CO_3Ca continuent à faire monter le pH jusqu'à une valeur limite (8,2) ; par contre les consommations d'azote minéral restent stationnaires.

II. — AZOTE NITRIQUE

Peut-on utiliser l'azote nitrique tout comme l'azote ammoniacal dans les enfouissements de paille ? Les expériences suivantes nous fourniront la réponse.

A. — Consommation de l'azote nitrique par les microorganismes.

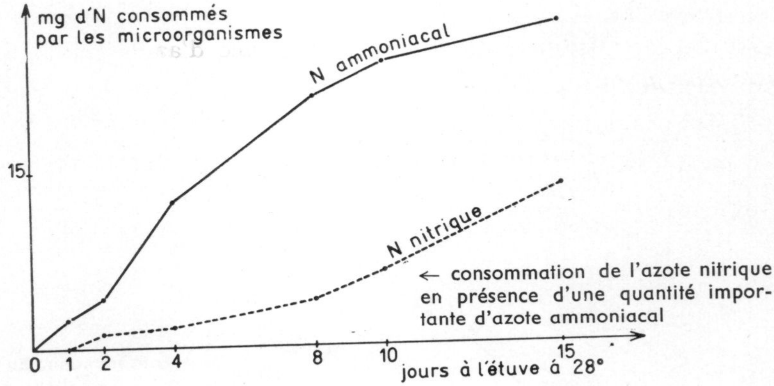
Les mélanges (100 g de terre + 100 mg d'azote ammoniacal ± 2 g paille) sont laissés des temps variables à 28°. L'azote ammoniacal commence alors à se nitrifier.

TABLEAU 43

Azote ammoniacal et azote nitrique.

Nombre de jours à l'étuve à 28°	1	2	4	8	10	15
Mg d'azote nitrique formés						
en absence de paille	0,7	1.5	1,7	5,6	9,1	16,4
en présence de paille	0.7	0,3	0,1	1,7	2,8	2,8
Mg d'azote nitrique consommés par les micro-organismes	0	1,2	1,6	3,9	6,3	13,6
Mg d'azote ammoniacal consommés pendant le même temps	2,4	4,2	12,5	21,3	24,1	27,3

Les microorganismes peuvent utiliser l'azote nitrique, mais ils semblent préférer l'azote ammoniacal qu'ils consomment en quantité plus importante (tableau 43, graphique 12) (32). Il faut toutefois



GRAPHIQUE 12.

remarquer qu'ils avaient à leur disposition beaucoup plus d'azote ammoniacal que d'azote nitrique.

Une seconde expérience nous permet de vérifier cette préférence.

Là aussi, nous arrivons au même résultat (tableau 44) ; les microorganismes qui attaquent les pailles enfouies préfèrent l'azote ammoniacal tout au moins au début de l'enfouissement (graphique 13).

Tandis que la quantité d'azote ammoniacal consommé en %. de paille diminue lorsque le poids de cellulose augmente, il n'en est pas de même avec l'azote nitrique qui est absorbé dans la proportion de 0,5

de N pour 100 de paille, aux erreurs d'expérience près, quelle que soit la quantité de paille mise en expérience.

TABLEAU 44

Azote ammoniacal et azote nitrique.

Grammes de paille ajoutés à 100 g terre + 100 mg d'azote ammoniacal ou nitrique	0,5	1	2	4	6
En présence d'azote ammoniacal, mg d'N ammoniacal consommés	10,2	15,5	25,3	39,3	51,2
Azote ammoniacal consommé en % de paille	2,0	1,5	1,2	1,0	0,8
En présence d'azote nitrique, mg d'N nitrique consommés	2,0	3,7	10,0	22,6	29,0
Azote nitrique consommé en % de paille	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5

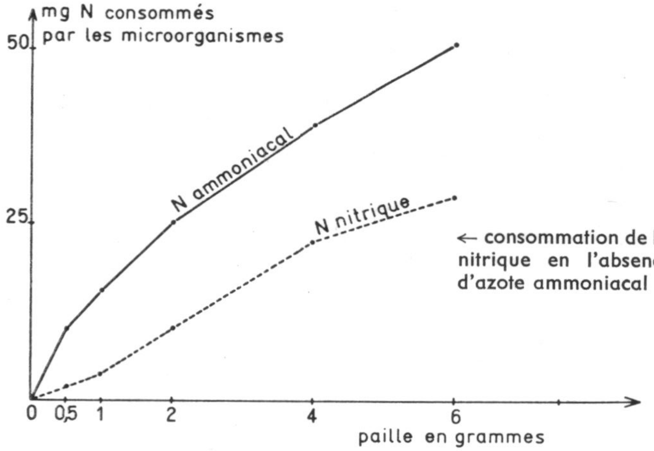
Essais ayant séjourné 10 jours à 28°.

La présence d'azote ammoniacal diminue la consommation d'azote nitrique puisque nous déduisons des deux tableaux précédents (43 et 44) :

Après 10 jours à 28° :

mg N nitrique consommés en absence d'azote ammoniacal : 10 (tableau 44) ;

mg N nitrique consommés en présence d'azote ammoniacal : 6,3 (tableau 43).



GRAPHIQUE 13. — Comparaison entre azote nitrique et azote ammoniacal.

RICHARDS et SHRIKLANDE (33) ont trouvé eux aussi que dans des conditions favorables à la décomposition, les microorganismes marquaient au début une préférence pour l'azote ammoniacal, cette préférence disparaissant d'ailleurs après 14 jours.

JANSSON, HALLAM et BARTHOLOMEW (34) sont arrivés à des conclusions voisines avec de l'azote marqué : consommation préférentielle de NH_3, immobilisation d'azote plus importante avec NH_3 qu'avec NO_3 et décomposition plus rapide. Mais, ces auteurs n'ayant pas prolongé leurs expériences au-delà d'une dizaine de jours n'ont pu établir si les deux formes minérales d'azote étaient finalement consommées en égale quantité, comme nous allons le montrer.

D'autres chercheurs (35) considèrent l'azote nitrique et l'azote ammoniacal comme des sources d'égale valeur pour la majorité des microorganismes décomposant la cellulose.

B. — Influence de la température sur la consommation de l'azote nitrique par les microorganismes.

Comme pour l'azote ammoniacal, des expériences de longue durée sont faites à 28° et à la température extérieure.

TABLEAU 45

Influence de la température sur la consommation d'azote par les microorganismes

	Mg d'N nitrique consommés par les micro-organismes	
	à la température extérieure	à 28°
après 2 jours	0,35	0
5 »	0,35	8,05
8 »	2,45	10,5
10 »	2,8	9,8
20 »	1,75	—
30 »	7,35	14
45 »	8,05	14,35
60 »	—	14,35
75 »	7,35	—
100 »	14,0	15,05
130 »	14,35	—

Les essais portent sur des mélanges contenant : 100 g terre $\pm$ 2 g paille + 100 mg N nitrique.

La comparaison de ces chiffres (tableau 45) avec ceux obtenus pour l'azote ammoniacal (tableaux 32 et 33) nous permet de constater une consommation plus lente de l'azote nitrique par les microorganismes. En effet, à 28°, il faut 8 jours (avec l'azote ammoniacal) et 30 (avec l'azote nitrique) pour arriver à la même consommation. La différence est encore plus grande à la température extérieure : ce qui est consommé en 20 jours avec l'azote ammoniacal l'est seulement en 100 jours avec l'azote nitrique.

Cependant dans les deux cas, à la température extérieure ou à 28°, les microorganismes arrivent à consommer la même quantité d'azote, nitrique ou ammoniacal, soit environ 14 à 15 mg d'azote pour 100 mg ajoutés à (100 g de terre + 2 g paille).

C. — Dégagement de gaz carbonique lors d'apport d'azote nitrique.

A l'appui des résultats obtenus précédemment, viennent s'ajouter ceux enregistrés avec l'analyseur de gaz.

D'après les quantités de gaz carbonique dégagé, on constate au début de l'enfouissement une décomposition plus intense avec l'azote ammoniacal (tableau 46). Ensuite, il y a ralentissement et finalement, en un peu plus d'un mois à 28°, nous arrivons à un dégagement comparable pour les deux formes d'azote (tableau 46), ce qui vient confirmer ce que nous avions trouvé pour les consommations d'azote.

TABLEAU 46

Mesures de gaz carbonique dégagé en présence d'azote ammoniacal ou d'azote nitrique.

Durée de séjour des essais à 28°	Azote ammoniacal			Azote nitrique		
	en absence de paille	en présence de paille	mg de CO_2 dégagés par les micro-organismes	en absence de paille	en présence de paille	mg de CO_2 dégagés par les micro-organismes
4 jours	48,6	353,1	304,50	32,4	268,9	236,50
8 «	97,2	693,3	596,1	51,8	579,9	528,1
12 «	142,5	962,30	819,80	71,3	793,8	722,5
18 «	226,8	1208,5	981,7	93,9	968,7	874,80
26 «	379,10	1419,1	1040	113,4	1114,5	1001,10
34 «	541,10	1632,9	1091,80	136,1	1221,5	1085,40

Résultats cumulatifs obtenus pour : (100 g terre ± 2 g paille + 100 mg azote ammoniacal ou nitrique) et exprimés en mg de CO_2.

A Toulouse, SOUBIES (17) a constaté comme nous, une identité d'action des formes nitrique et ammoniacale pour des essais in-vitro.

Par contre à Antibes (27), sous climat méditerranéen, l'azote ammoniacal serait moins bien consommé par la microflore.

III. — AZOTE ORGANIQUE

Quand nous enfouissons de la paille en présence d'une source d'azote organique, nous ne pouvons pas, comme pour l'azote minéral, suivre la consommation de cet azote. En effet, chimiquement, il nous est impossible

de différencier l'azote organique introduit de l'azote organique provenant du sol.

Des mesures de dégagement de gaz carbonique permettent alors de suivre la décomposition de la paille enfouie en présence d'azote organique, mais là, comme précédemment, nous supposons une régularité de tous les processus microbiens en absence et en présence de paille.

L'azote organique ajouté peut avoir une origine animale (sang) ou végétale (foin de luzerne, tourbe).

La décomposition de la paille apparaît très forte en présence de foin dont l'azote peut servir aux microorganismes au même titre que l'azote ammoniacal (tableau 47). Dans la pratique, on enfouit souvent la paille en même temps qu'une légumineuse, sans apporter d'autre source d'azote. Ainsi, grâce à l'azote contenu dans celle-ci, la paille se décompose suffisamment jusqu'au printemps et ne présente plus d'inconvénient pour la culture suivante (expérience du Dr GROH (36)).

TABLEAU 47

Dégagement de gaz carbonique.

Nature de l'azote ajouté	Durée de séjour des essais à 28° en jours	En absence de paille	En présence de paille	Mg de CO_2 dégagés par les microorganismes
Azote ammoniacal	49	142,5	440,60	298,10
Azote organique				
Foin	49	486	894,2	408,2
Tourbe	45	155,5	307,8	152,30
Sang	50	327,20	554	226,80

Ces chiffres sont obtenus pour des mélanges comprenant 100 g terre ± 2 g paille + 100 mg d'N (ammoniacal ou organique) et sont exprimés en mg de CO_2.

DECOUX (37) estiment que la légumineuse peut non seulement remplacer l'azote minéral, mais encore faciliter la décomposition de la paille. Pour lui, la meilleure solution consiste à ensemencer un engrais vert de printemps dans la céréale précédant la betterave. Il faut alors faucher haut à la moisson et après le passage de la moissonneuse batteuse, on épand la paille sur le champ. Les tiges de l'engrais vert traversent alors le lit de paille, le dépassent et constituent un milieu humide et frais, favorable à la décomposition de la paille.

L'azote du sang serait également utilisé par les microorganismes attaquant la paille, mais la décomposition de celle-ci est moins active qu'en présence de foin.

En ce qui concerne la tourbe, les dégagements gazeux prouvent qu'une faible partie de l'azote de celle-ci se minéralise et est consommée par les microorganismes.

Chapitre III

CONCLUSIONS PRATIQUES

Jusqu'à ces dernières années, l'enfouissement des pailles a surtout été étudié au champ dans un but pratique. Aussi, avons-nous entrepris au laboratoire une étude scientifique de la question. Les résultats obtenus permettent de déterminer la quantité d'azote minéral qu'il faut apporter en même temps que la paille pour éviter l'effet dépressif sur les cultures. Ils permettent également de préciser les conditions optima de décomposition des pailles enfouies dans le sol.

Aussi, d'après nos essais, conseillons-nous pour empêcher une action dépressive sur les plantes, d'enfouir en même temps que la paille une dose d'azote minéral au moins double de celle employée pour la fabrication du fumier artificiel, soit de l'ordre de 10 à 12 kg par tonne de paille.

Ce chiffre concorde avec ceux publiés précédemment par de nombreux auteurs : ainsi, comme Soubies (17), Hutchinson et Richards (38) estiment que la décomposition de la paille exige au moins 7 à 7,5 kg d'azote par tonne de paille dont la teneur en azote est égale à 0,5 p. 100. Il suffirait de 1,7 p. 100 d'azote (teneur de la paille comprise) pour assurer la décomposition du seigle d'après des essais de Waksman et Tenney (39). Dans les expériences de Lemmermann, Jessen et Engel (40) l'effet dépressif disparaît si la teneur totale (paille + engrais) en azote avant la décomposition est d'environ 1,2 p. 100.

La forme d'azote minéral ajouté, nitrique ou ammoniacale, est finalement sans importance. Toutefois, la décomposition est plus rapide au début avec l'azote ammoniacal, mais dans les deux cas, les microorganismes consomment la même quantité d'azote. Il faut cependant, pour la forme ammoniacale, apporter au départ une dose plus forte d'azote par suite de la fixation physico-chimique de l'ammoniaque par la terre.

L'azote minéral peut être remplacé par un engrais vert, en particulier une légumineuse, qui fournit alors de l'azote et constitue un milieu favorable à l'humidification et à l'humification de la paille.

La décomposition des pailles, dépend également de la *température* et de *l'humidité*. Ceci explique que, dans nos régions, nous l'avons vu, les pluies d'automne et d'hiver suffisent pour la décomposition des pailles enfouies après la récolte et qu'en général, après une année, on ne retrouve presque plus de fragments non désorganisés.

Par contre, sous le climat méditerranéen, où après la moisson, le sol est desséché et difficile à travailler, il faut attendre souvent pour enfouir les pailles que les orages ou les pluies de septembre permettent le travail du sol. L'humification est alors très rapide sous ce climat et au printemps, on ne remarque que de rares débris non humifiés. Le problème est tout à fait différent en Afrique du Nord par suite de la moindre pluviosité. En juin-juillet, on retrouve alors dans le sol, non encore décomposées, les pailles apportées huit à dix mois auparavant.

La décomposition des pailles dépend également du *pH* des sols. Très ralentie en milieu acide, elle devient de plus en plus importante au fur et à mesure que le pH s'élève. Elle est à peu près identique à la neutralité ou en milieu légèrement alcalin. La dégradation des pailles a donc lieu dans les limites de pH favorables à la vie microbienne.

Les sols même très pauvres, seraient suffisamment pourvus en phosphore pour subvenir aux besoins de la flore microbienne et permettre l'humification des pailles. Quant à la *potasse*, la paille en apporte des quantités non négligeables qui, dans le cas de certaines terres ou de certaines cultures (pommes de terre) peuvent provoquer des augmentations de rendement.

Le *tronçonnage* de la paille joue aussi un rôle très important. Il est confirmé qu'on ne doit enfouir que de la paille finement hachée et le mélange avec le sol doit être fait intimement, sinon la terre devient soufflée et certaines cultures telles que les betteraves et les céréales souffrent d'une terre « creuse ». Les pommes de terre par contre bénéficient de cet allégement du sol. Une paille tronçonnée s'humifiera plus vite qu'une paille entière, cependant sa décomposition exigera toujours autant d'azote.

La *nature* du sol, son *taux d'argile*, son *aération* influencent cette dégradation qui est due — nous allons la voir dans la deuxième partie — à des microorganismes aérobies. Il sera intéressant, après l'étude microbiologique de la question, de comparer les conditions optima de décomposition des pailles, vues du point de vue agricole et celles favorisant le développement et l'activité de la flore aérobie spécialisée dans l'attaque de ces pailles.

(à suivre).

631. 416. 872 : 634. 989. 84.

ADSORPTION ET DILUTION ISOTOPIQUE DES IONS PHOSPHORIQUES AU CONTACT DES HYDROXYDES MÉTALLIQUES ET DES ARGILES

PAR

R. BLANCHET

Station Agronomique, Châteauroux.

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

Adsorption des ions PO_4 par les hydroxydes métalliques et les argiles.

Techniques expérimentales.

Adsorptions et précipitations.

Comparaison des pouvoirs adsorbants de ces divers colloïdes.

Dilution isotopique des ions PO_4 adsorbés.

Comparaison globale de la mobilité des ions PO_4 retenus par les argiles et les hydroxydes métalliques.

Distinction entre la fixation calcique et la fixation aluminique chez les argiles.

Conclusions.

Appendice : Quelques caractères de la dilution isotopique des ions PO_4.

INTRODUCTION

Deux phénomènes très distincts interviennent dans la rétention des ions phosphoriques par le sol : des réactions d'adsorption d'une part, des réactions de précipitation d'autre part.

L'adsorption s'effectue par l'intermédiaire des colloïdes argileux et humiques, du calcaire, et des hydroxydes métalliques (1, 2, 3, 4). Les argiles paraissent intervenir à la fois grâce aux atomes d'Al présents à la surface des cristaux (5), et grâce aux ions Ca^{++} échangeables (1) ; l'intensité de leur pouvoir adsorbant dépend de leur nature minéralogique (6).

Les colloïdes humiques adsorbent également les ions PO_4 ; ils peuvent en outre les protéger contre la précipitation de phosphates calciques (2, 7, 8). L'adsorption s'effectue aussi sur le calcaire, en dehors de toutes précipitations (3,9) ; le pouvoir adsorbant est fonction de la grosseur des grains de calcaire. Enfin, les hydroxydes métalliques possèdent grâce à leur charge positive un pouvoir adsorbant élevé à l'égard des ions PO_4 (4, 9, 10).

Des précipitations de phosphates calciques se produisent au contact du calcaire lorsque les solutions du sol sont relativement concentrées, selon les règles des produits de solubilité (3, 9, 11). Des précipitations peuvent également intervenir au contact des hydroxydes métalliques (12).

La mobilité des ions adsorbés et précipités est naturellement très différente. Les ions PO_4 adsorbés sont en mouvement continuel entre l'adsorbant et la solution en équilibre avec lui, constituant le « pool » des ions PO_4 à partir duquel les plantes s'alimentent essentiellement (13,14). Les phosphates précipités ne peuvent se dissoudre qu'en fonction des produits de solubilité, ou sous l'influence directe, par exemple, d'excrétions radiculaires. Dans son aspect cinétique, la dilution isotopique constitue l'une des meilleures techniques d'étude de la mobilité des ions PO_4 ; la vitesse de la dilution isotopique est sensiblement identique à la vitesse de la désorption (15).

Nous rapportons ici divers résultats concernant les phénomènes d'adsorption et de précipitation des ions PO_4 qui se produisent au contact des hydroxydes métalliques et des argiles. A l'égard de celles-ci, nous avons tenté de dissocier l'adsorption « calcique » et l'adsorption « aluminique ». La mobilité des ions PO_4 retenus par ces divers processus a été examinée, et nous conduit à formuler divers remarques relatives aux réactions de dilution isotopique.

A. — ADSORPTION DES IONS PO_4 PAR LES HYDROXYDES MÉTALLIQUES ET LES ARGILES

I. — Techniques expérimentales.

1° Préparation des hydroxydes métalliques.

L'hydroxyde de fer colloïdal a été préparé en neutralisant par l'hydroxyde de sodium une solution concentrée de chlorure ferrique. Le précipité a été ensuite lavé jusqu'à élimination du chlore, puis mis en suspension dans l'eau. La phase solution de cette suspension ne contenait pas de fer décelable chimiquement.

L'hydroxyde d'aluminium a de même été obtenu en alcalinisant par l'ammoniaque, jusqu'à pH 8, une solution de nitrate d'aluminium.

Le précipité a été lavé jusqu'à élimination des ions NH_4^+, et mis en suspension dans l'eau (pH 6,8).

Aucune dessiccation de ces hydroxydes n'est intervenue au cours de leur préparation ; ils sont restés essentiellement sous forme colloïdale (hydrosols).

2° Adsorption des ions PO_4.

a) *Sur l'hydroxyde ferrique.* — Des volumes constants de suspension ferrique ont été additionnés de quantités croissantes de solutions de phosphate disodique, en milieu acétate de sodium 0,01 N(force ionique comparable à celle des solutions du sol, pH 7,5), afin d'établir la courbe d'adsorption. Ces hydrosols ont été abandonnés, en les agitant périodiquement, jusqu'à l'obtention de l'équilibre, soit environ un mois. Les quantités de P fixées ont été alors déterminées d'après l'analyse de la phase solution et l'on établit ainsi la courbe d'adsorption.

Des essais d'adsorption identiques ont été réalisés également sur une gœthite pure, hydroxyde ferrique cristallisé que l'on rencontre assez fréquemment dans les sols tropicaux à évolution latéritique.

b) *Sur l'hydroxyde d'aluminium.* — De même que pour l'hydroxyde ferrique, des volumes constants de suspension aluminique ont été additionnés de quantités croissantes de solutions phosphatées, en milieu ClK, 0,01 N. Les ions PO_4 étaient apportés ici sous forme de proportions égales de phosphates monosodique et disodique, afin de conserver le même pH 6,8 correspondant à la plus faible solubilité de l'hydroxyde d'aluminium. Ces suspensions ont été également abandonnées jusqu'à l'obtention de l'équilibre, soit environ trois semaines, en les agitant périodiquement, et les quantités de P fixées ont été déterminées par l'analyse de la phase solution.

3° Dessiccation des hydroxydes, avant ou après fixation des ions PO_4

a) Une fraction de l'hydroxyde ferrique a été laissée sécher à l'air aussitôt après sa préparation (paragraphe 1 ci-dessus), avant toute adsorption d'ions PO_4. Au bout de trois mois, l'hydroxyde a été broyé au mortier, remis en suspension dans l'acétate de sodium 0,01 N et mis au contact d'ions PO_4, comme précédemment. On remarque, pendant la remise en suspension, qu'une large fraction de l'hydroxyde est demeurée sous forme colloïdale (suspensions assez stables).

b) Une autre fraction de l'hydroxyde ferrique a de même été séchée à l'étuve à 80°, puis additionnée de P. Ici encore, l'hydroxyde s'est peu cristallisé.

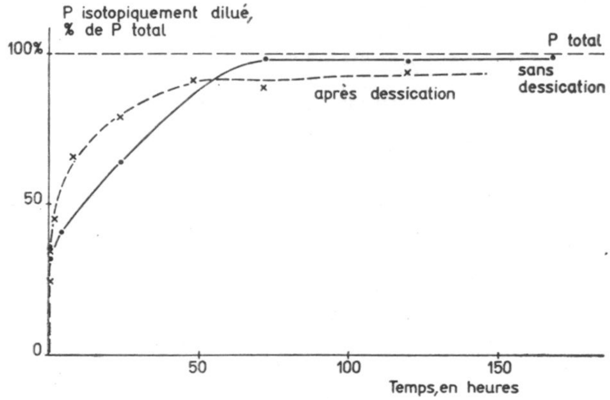
c) Une suspension d'hydroxyde ferrique parvenue à l'équilibre d'adsorption des ions PO_4 (composé Fe (OH_3)-PO_4) a été séchée à l'étuve

à 38°. La dessiccation s'est effectuée en trois jours. Le composé a été ensuite broyé au mortier, remis en suspension dans l'eau, et agité jusqu'à l'obtention du nouvel équilibre.

d) Une suspension d'hydroxyde d'aluminium ayant fixé des ions PO_4 a été également séchée à l'étuve à 38° (composé Al $(OH)_3$-PO_4). La dessiccation s'est réalisée aussi en trois jours, puis le composé a été broyé, remis en suspension dans l'eau et agité jusqu'à l'équilibre.

4° Distinction entre adsorptions et précipitations.

Cette distinction a été faite surtout d'après les résultats de la dilution isotopique. Dans les suspensions, les ions PO_4 adsorbés sont en équilibre avec les ions PO_4 de la phase solution, et en état de permutation con-



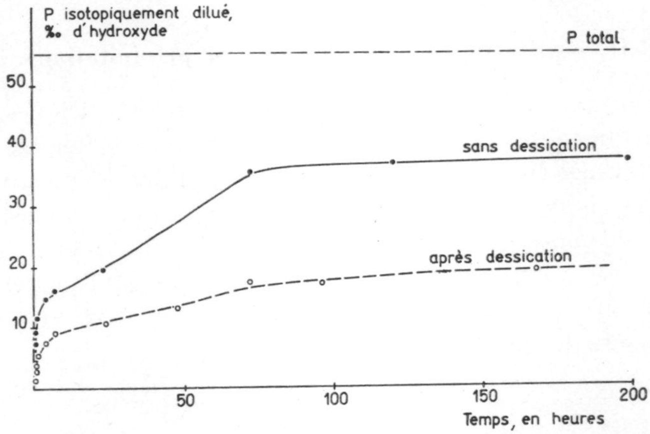
GRAPHIQUE 1. — Hydroxyde ferrique. Quantités de P isotopiquement diluées, en fonction du temps.

tinuelle avec eux. Ils se mélangent ainsi intimement avec les ions $^{32}PO_4$ incorporés au système (définition du « pool » d'ions PO_4 isotopiquement diluables). Les ions PO_4 adsorbés participent donc, en des temps plus ou moins longs, à la dilution isotopique.

Les ions PO_4 appartenant à des précipités ferriques ou aluminiques possèdent des mobilités beaucoup plus faibles. Il n'est pas exclu qu'ils puissent donner lieu à quelques échanges isotopiques, mais le volume de ces échanges est beaucoup plus faible qu'avec les ions PO_4 adsorbés (4).

Nous avons considéré ici les cinétiques de dilution isotopique, c'est-à-dire les courbes représentant les quantités de P isotopiquement diluées en fonction du temps. Au bout de trois jours environ, ces courbes présentent un palier très net, la dilution isotopique ne progresse plus sensiblement (graphiques 1 et 2). Nous assimilons le P isotopiquement dilué

ainsi au P adsorbé, et le P non isotopiquement diluable au P précipité. Bien qu'elle comporte un peu d'arbitraire, cette distinction paraît voisine de la réalité.



GRAPHIQUE 2. — Hydroxyde d'aluminium. Quantités de P isotopiquement diluées, en fonction du temps.

Les mesures de vitesses de dilution isotopique ont été réalisées par les procédés habituels (6). L'ensemble des techniques expérimentales appliquées aux hydroxydes métalliques est résumé dans le schéma ci-dessous.

Hydroxyde ferriqne colloïdal ↗ Adsorption P ↗ Dilution isotopique
Adsorption P ↘ Dessiccation → remise en suspension → dilution isotopique
Hydroxyde ferriqne colloïdal ↘ Dessiccation → remise en suspension → adsorption P

Hydroxyde ferrique cristallisé (goethite) → Adsorption P

Hydroxyde d'Aluminium → Adsorption P ↗ Dilution isotopique { à divers degrés de saturation en P ; à différentes températures }
Adsorption P ↘ dessiccation → remise en suspension → dilution isotopique

5° Préparation des argiles, et enrichissement en P.

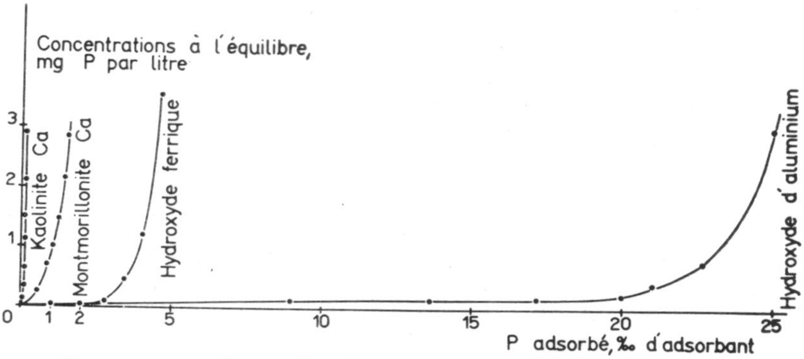
Les techniques utilisées dans la préparation de ces argiles et leur enrichissement en P ont été décrites précédemment (6). Nous ne ferons donc que les rappeler brièvement.

Les argiles utilisées sont une kaolinite des Eyzies et une montmorillonite de Camp-Bertaux, décrites par WEY (5). Elles ont été purifiées par HCl 0,2 N, lavées à l'eau, et dispersées par NaOH ; la fraction inférieure à 2 μ a été recueillie par décantation, floculée et lavée, remise en suspension, puis neutralisée à pH voisin de 7 par l'eau de chaux, en milieu Cl_2Ca 0,01N. Des additions successives de solutions de phosphate mono-

calcique ont été ensuite effectuées, afin d'enrichir peu à peu l'argile sans que la concentration en P de la phase solution dépasse 3mg P par litre, pour éviter la précipitation de phosphates calciques. Chaque état d'équilibre correspond à un point de la courbe d'adsorption.

II. — Résultats : adsorptions et précipitations.

L'importance des précipitations de phosphates calciques, ferriques ou aluminiques, appelées souvent « rétrogradations », semble avoir été plutôt surestimée (10), mais de tels phénomènes interviennent néanmoins. Dans nos essais sur argiles calciques, nous n'avons pas enregistré de précipitations de phosphates, à la condition de maintenir suffisamment diluée en P la phase solution (6). Des précipitations de phosphates ferriques et surtout aluminiques ont été par contre nettement observées, notamment au cours des dessiccations.



GRAPHIQUE 3. — Comparaison des pouvoirs adsorbants des divers colloïdes.

1° **Hydroxydes ferriques.** — Le graphique 1 représente, en fonction du temps, les quantités de P isotopiquement diluées dans les systèmes Fe $(OH)_3$-PO_4, sans dessiccation et après dessiccation. Dans la suspension non desséchée, l'essai de dilution isotopique a été effectué cinq mois après l'addition de P. Malgré ce long délai, la totalité des ions PO_4est retrouvée isotopiquement diluable en trois jours (temps comparable à celui qui est nécessaire pour obtenir la dilution isotopique des ions PO_4 adsorbés par des argiles). Il s'agit bien d'une adsorption, comme l'indique par ailleurs la courbe du graphique 3 et les indications qui s'y rapportent (paragraphe 3 ci-dessous).

Après dessiccation de la suspension ferrique renfermant les ions PO_4, on ne retrouve sous forme isotopiquement diluable que 92 p. 100 environ du P apporté. De légères précipitations se sont donc produites.

2° **Hydroxydes d'aluminium.** — Les résultats obtenus sont représentés sur le graphique 2 de la même façon que pour les hydroxydes

ferriques. On observe ici d'importantes précipitations de phosphates aluminiques :

— sans dessiccation on ne retrouve sous forme adsorbée, isotopiquement diluable, que 68 p. 100 du P introduit ;

— après dessiccation, cette proportion s'abaisse à 35 p. 100.

Dans des conditions expérimentales comparables, les précipitations de phosphates aluminiques sont donc considérablement plus importantes que les précipitations de phosphates ferriques.

III. — Comparaison des pouvoirs adsorbants de ces divers colloïdes.

1° **Courbes d'adsorption.** — La comparaison de ces pouvoirs adsorbants apparaît sur le graphique 3, qui représente les courbes d'adsorption obtenues sur la kaolinite Ca, la montmorillonite Ca, l'hydroxyde ferrique et l'hydroxyde d'aluminium. Les valeurs portées en abscisses correspondent à des ions PO_4 effectivement adsorbés, isotopiquement diluables en trois jours au maximum.

L'examen de ces courbes, qui présentent toutes la même forme générale, met en évidence la disproportion existant entre les pouvoirs adsorbants de ces divers colloïdes. Ainsi, une concentration d'équilibre de 1 mg P par litre correspond à l'adsorption de :

Kaolinite Ca : 0,14 p. 1000 de P.

Montmorillonite Ca : 1 p. 1000 de P.

Hydrosol d'hydroxyde ferrique : 4 p. 1000 de P.

Hydrosol d'hydroxyde d'aluminium : 23 p. 1000 de P.

En ce qui concerne les hydroxydes métalliques, le phénomène décrit ici est bien une adsorption. Le pourcentage de P restant en solution augmente progressivement avec la quantité de P introduite, comme dans tout phénomène d'adsorption. Les concentrations sont d'abord très faibles, puis elles augmentent fortement, faisant apparaître le voisinage de la saturation de l'hydroxyde (graphique 3).

D'autre part, on peut remarquer que le composé d'adsorption ferrique renferme environ 1 à 5 de P pour mille de Fe $(OH)_3$, soit un rapport P/Fe de 1/500 à 1/100, alors que dans le phosphate ferrique le même rapport pondéral P/Fe est voisin de 1/2. La disproportion est du même ordre pour le composé aluminique.

Signalons enfin qne, en ce qui concerne le calcaire, le pouvoir adsorbant des grains de CO_3Ca est naturellement très lié à leur grosseur, c'est-à-dire à l'étendue de leur surface (5) ; en première approximation, ce pouvoir adsorbant est du même ordre de grandeur que celui des argiles.

2° **Les diverses formes d'hydroxydes ferriques : le fer libre.** — Dans les sols de climat tempéré, le principal agent du « pouvoir fixateur » des sols à l'égard des ions PO_4 est le fer libre (18). Il convient toutefois de préciser cette notion de fer libre (19) qui englobe en réalité deux types de composés dont le comportement à l'égard des ions PO_4 est assez différent :

— des hydroxydes ferriques colloïdaux, qui adsorbent fortement les ions PO_4 (graphique 3) ; ces hydroxydes colloïdaux sont extraits par les agents assez doux (méthode Demolon à l'acide oxalique, par exemple) ;

— des hydroxydes ferriques cristallisés, notamment la gœthite ; ces hydroxydes cristallisés sont extraits par les agents plus énergiques, tels que l'hydrosulfite de sodium (19).

Or, dans nos essais, la gœthite n'a montré qu'un pouvoir adsorbant très faible à l'égard des ions PO_4 (de l'ordre de 0,1 mg P par gramme de gœthite), sans grandes variations selon le pH, et bien que l'essai ait été poursuivi pendant plusieurs mois.

Dans les études tendant à l'examen du rôle des hydroxydes ferriques dans la dynamique du phosphore dans le sol, il convient donc de s'attacher surtout aux formes colloïdales. C'est ainsi que DEMOLON, BOISCHOT et LAJON ont obtenu une corrélation étroite entre la teneur en fer libre colloïdal et le pouvoir adsorbant des sols (18).

Les hydroxydes séchés à l'air ou à l'étuve à 80° avant l'adsorption de P ont présenté un comportement sensiblement identique à celui des hydroxydes non desséchés. Leur pouvoir adsorbant ne se trouve pas notablement diminué, ce qui correspond bien à leur maintien à l'état amorphe, rapporté ci-dessus.

3° **Equilibre existant entre les divers adsorbants.** — Lorsque divers adsorbants se trouvent en mélange, et en présence d'ions PO_4, ce qui est le cas général des sols, un équilibre se réalise entre eux, de telle sorte que le potentiel électro-chimique de ces ions soit égal en tous les points du système sol-solution (c'est-à-dire à la surface de tous les absorbants et dans la solution en équilibre avec eux). Ce fait ressort de la définition même de l'adsorption. D'autre part, d'après l'existence et la définition du « pool » d'ions PO_4 isotopiquement diluables, on ne peut distinguer des ions PO_4 adsorbés par l'argile et des ions PO_4 adsorbés par l'hydroxyde ferrique, par exemple. Ces ions sont en effet en mouvement continuel d'un adsorbant à l'autre et à la solution en contact avec eux.

La répartition des ions PO_4 entre les divers adsorbants ne dépend que des proportions relatives de ceux-ci, et de leurs capacités d'adsorption. Un sol possède un pouvoir adsorbant d'autant plus élevé qu'il renferme davantage d'hydroxydes métalliques colloïdaux à forte capacité

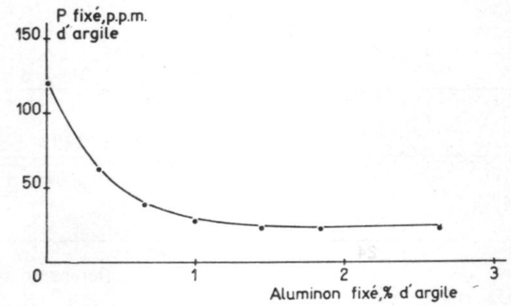
d'adsorption, en particulier des hydroxydes d'aluminium (sols latéritiques). Si le sol est homogène, la répartition des ions PO_4 entre les divers adsorbants s'effectue de telle sorte que soit respectée l'égalité des potentiels électrochimiques, c'est-à-dire surtout en faveur des colloïdes à capacité d'adsorption élevée.

B. — DILUTION ISOTOPIQUE DES IONS PO_4 ADSORBÉS

Le but de ces essais était de comparer les mobilités des ions PO_4 retenus par les divers adsorbants. Deux aspects ont été particulièrement abordés :

— la comparaison globale des mobilités des ions PO_4 retenus par les argiles d'une part, par les hydroxydes métalliques d'autre part, afin d'examiner dans quelle mesure la présence d'hydroxydes métalliques dans le sol peut réduire la mobilité des ions PO_4 ;

— chez les argiles, nous avons tenté de distinguer la fixation calcique et la fixation aluminique, et de comparer les mobilités correspondant aux deux modes de rétention.



GRAPHIQUE 4. — Quantités de P fixées par les argiles, en fontion de leurs teneurs en aluminon

I. — Comparaison globale de la mobilité des ions PO_4 retenus par les argiles et les hydroxydes métalliques.

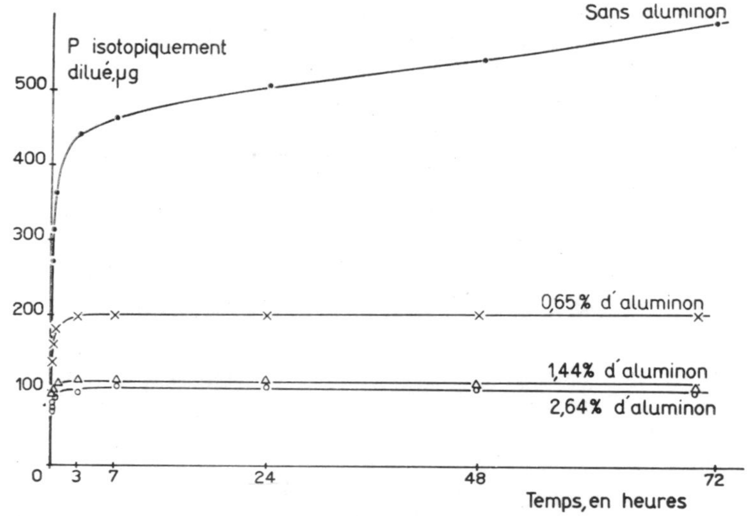
Les résultats obtenus au cours de l'étude de la cinétique de la dilution isotopique des ions PO_4 adsorbés par des argiles calciques ont été exposés précédemment (6). Nous en rappelons seulement ici les principaux traits :

— la cinétique de la dilution isotopique des ions PO_4 correspond, dans l'ensemble, à la cinétique de leur désorption ;

— la dilution isotopique s'effectue en deux phases très distinctes : une première phase extrêmement rapide, d'une durée approximative de quinze minutes, et une seconde phase beaucoup plus lente ; l'équilibre de distribution isotopique se réalise en trois jours environ (graphique 5, courbe supérieure) ;

— la vitesse de la dilution isotopique ne dépend pas de la concentration des ions PO_4 dans la phase liquide, même lorsque la force ionique de celle-ci est maintenue constante. Elle ne dépend donc pas de leur activité ; elle est plutôt une fonction inverse de leur énergie d'adsorption.

Au cours des essais rapportés ici, nous n'avons pas observé de différences fondamentales entre les cinétiques de dilutions isotopiques d'ions PO_4 adsorbés par les argiles calciques ou par les hydroxydes métalliques (graphiques 1 et 2). En effet, la dilution isotopique s'effectue sur ces derniers en trois jours environ ; sur l'hydroxyde d'aluminium, elle semble se poursuivre très lentement ensuite, laissant supposer de faibles échanges avec les phosphates précipités. Quoique les deux phases de la dilution



GRAPHIQUE 5. — Quantités de P isotopiquement diluées en fonction du temps, argiles diversement enrichies en aluminon.

soient moins tranchées que dans le cas des argiles, on observe encore une vitesse très élevée au début de la réaction, beaucoup plus faible ensuite. Ce fait correspond aux observations faites au cours des manipulations : une part des adsorptions et désorptions s'effectue très rapidement lorsque l'on rompt les équilibres, mais ceux-ci ne s'établissent définitivement qu'en des temps assez longs. Enfin, la vitesse de la dilution isotopique ne dépend pas de l'activité des ions PO_4 (ce point sera précisé ci-dessous).

La mobilité des ions PO_4 adsorbés par des hydroxydes métalliques reste donc élevée, et du même ordre de grandeur que celle des ions PO_4 adsorbés par les argiles. Ce fait correspond bien aux observations faites sur des sols tropicaux à évolution latéritique : la dilution isotopique du phosphore de ces sols présente sensiblement les mêmes caractères que dans les sols tempérés.

II. — Distinction entre fixation « calcique » et fixation « aluminique » des argiles.

1° **Principe.** — L'aluminon, sel ammoniacal de l'acide aurinetricarboxylique, est un réactif spécifique de l'aluminium, avec lequel il forme une laque en milieu acide (5,16). WEY a établi que, vers pH 4 à 5, l'aluminon se fixe sur l'argile, entrant éventuellement en compétition avec les ions PO_4 (5). Vers pH 4, les capacités d'adsorption de l'argile pour l'aluminon ou pour les ions PO_4 sont voisines. Ces faits, parmi d'autres, conduisent WEY à penser que les atomes d'Al se trouvant au voisinage de la surface des particules d'argile sont principalement responsables de l'adsorption des ions PO_4. Le même auteur constate toutefois l'influence du calcium sur la rétention de ces ions, mise largement en évidence notamment par BARBIER (1).

Dans le cas habituel des sols, c'est-à-dire d'argiles floculées par des ions Ca^{++}, à un pH voisin de la neutralité, deux mécanismes de rétention des ions PO_4 paraissent donc coexister : fixation « aluminique » à la surface du réseau cristallin, et fixation « calcique » dans l'atmosphère ionique entourant la particule d'argile.

Nous avons tenté de distinguer les deux phénomènes, en réalisant l'adsorption d'ions PO_4 sur une kaolinite enrobée de quantités croissantes d'aluminon, en milieu calcique neutre, et en étudiant ensuite la vitesse de la dilution isotopique des ions PO_4 adsorbés. On peut en effet supposer que les ions PO_4 liés aux ions Ca^{++} dans l'atmosphère ionique de la particule d'argile se diluent isotopiquement avec une plus grande vitesse que ceux qui sont retenus à la surface du réseau cristallin (6). L'existence de deux phases distinctes dans la dilution isotopique du P adsorbé par les argiles renforce d'ailleurs cette hypothèse (6).

2° **Mode opératoire.** — L'argile n'adsorbe pas sensiblement l'aluminon en milieu neutre. Pour obtenir de l'argile Ca enrobée d'aluminon, il est nécessaire de réaliser d'abord la fixation de l'aluminon en milieu acide, puis de neutraliser ensuite par l'eau de chaux. A cet effet, les suspensions de kaolinite-H ont été additionnées d'aluminon, dans la proportion de 0 à 10 p. 100 du poids de l'argile, et amenées à pH 4 par quelques gouttes d'acide chlorhydrique dilué. Après quatre heures d'agitation, l'excès d'aluminon a été éliminé par filtration sous vide, suivie d'un léger lavage. L'argile a été ensuite remise en suspension en milieu Cl_2Ca 0,01 N, et neutralisée par l'eau de chaux. Elle a été enfin enrichie en ions PO_4, de façon que les solutions en équilibre avec l'argile renferment environ 2 mg P par litre. Lorsque cet équilibre a été atteint, les mesures de vitesse de dilution isotopique ont été effectuées sur des suspensions de teneurs croissantes en aluminon.

La proportion d'aluminon retenue par l'argile a été déterminée d'après la différence entre les quantités apportées et éliminées au moment de la filtration. Cette proportion variait entre 0 et 2,5 p. 100 du poids de l'argile. L'aluminon était dosé par manganimétrie, selon la technique indiquée par WEY (5).

Dosage de P. — Au cours de la neutralisation par l'eau de chaux, il se produit une légère libération d'aluminon. La coloration orangée des solutions, due à l'aluminon, ne gêne cependant pas le dosage du phosphore, si l'on opère de la façon suivante :

Le dosage est fait par coeruleo-molybdimétrie, en utilisant comme agent réducteur l'acide ascorbique, qui permet d'obtenir une coloration très stable (17). Cette coloration est développée dans un tube de centrifugeuse ; l'acidification entraîne l'insolubilisation de l'aluminon, que l'on laisse déposer pendant quelques heures. Il suffit ensuite de centrifuger quelques minutes. Nous avons contrôlé que, de cette façon, l'aluminon n'interférait pas dans le dosage de P.

3° **Résultats.** — Le graphique 4 indique les quantités de P retenues par des kaolinites renfermant des proportions croissantes d'aluminon. La rétention des ions PO_4 diminue très fortement au fur et à mesure que l'argile est plus enrobée d'aluminon, jusqu'à un palier qui paraît bien correspondre à la fixation calcique. Cette fixation calcique ne représenterait que 17 p. 100 de l'adsorption totale.

Les vitesses de dilution isotopique ont été étudiées sur quelques-unes de ces argiles(échantillon renfermant : 0 ; 0,65 ; 1,44 et 2,64 p. 100 d'aluminon) ; les résultats sont indiqués par le graphique 5. On constate que, dans les deux échantillons les plus enrichis en aluminon, la dilution isotopique est extrêmement rapide : elle est sensiblement terminée en trente minutes. Il n'apparaît sensiblement ici que la première phase rapide de cette dilution. Dans l'échantillon renfermant 0,65 p. 100 d'aluminon, la dilution isotopique s'effectue encore essentiellement durant la première phase rapide. Enfin, l'échantillon ne renfermant pas d'aluminon présente la cinétique habituelle, avec une première phase rapide et une seconde phase lente.

Ainsi, l'enrichissement croissant de cette kaolinite en aluminon, c'est-à-dire le blocage de plus en plus poussé des atomes d'Al de la surface de l'argile, entraîne d'une part une diminution considérable de la rétention des ions PO_4, d'autre part la disparition progressive de la phase lente de la dilution isotopique. On peut donc raisonnablement attribuer aux ions PO_4 retenus par l'intermédiaire des ions Ca^{++} la dilution isotopique la plus rapide, donc la plus grande mobilité, et aux ions PO_4 fixés à la surface du réseau par l'intermédiaire des atomes d'Al la dilution isotopique lente, c'est-à-dire la mobilité la plus réduite.

On doit d'ailleurs remarquer que la courbe supérieure du graphique 5

(argile dépourvue d'aluminon) présente avec celles du graphique 3 (hydroxyde d'aluminium) une très grande ressemblance.

De ces essais, il ressort donc que les ions PO_4 adsorbés par l'argile au moyen de liaisons calciques possèdent la plus grande mobilité. Les ions retenus par les hydroxydes métalliques d'une part, par les atomes d'Al de l'argile d'autre part, présentent une mobilité plus faible.

C. — CONCLUSIONS

Une adsorption très intense des ions PO_4 s'effectue au contact des hydroxydes métalliques colloïdaux, en particulier de l'hydroxyde d'aluminium. Les pouvoirs adsorbants des constituants du sol étudiés ici vont croissant dans l'ordre suivant : Kaolinite Ca, Montmorillonite Ca, hydroxyde ferrique et hydroxyde d'aluminium colloïdaux. La gœthite, hydroxyde ferrique cristallisé, ne manifeste qu'un faible pouvoir adsorbant ; dans les déterminations de « fer libre » en tant qu'agent du pouvoir fixateur des sols, il importe de considérer surtout l'hydroxyde colloïdal. Un équilibre s'établit entre ces divers adsorbants lorsqu'ils se trouvent en mélange. La mobilité des ions PO_4 adsorbés par ces différents minéraux est du même ordre de grandeur. Toutefois, les ions PO_4 retenus par l'intermédiaire des ions Ca^{++} de l'argile calcique sont plus mobiles que les ions PO_4 retenus soit par les atomes d'Al de la surface du réseau de ces argiles, soit par les hydroxydes métalliques.

Outre des phénomènes d'adsorption, des précipitations de phosphates se sont produites au contact des hydroxydes métalliques. Dans les conditions expérimentales réalisées ici, elles ont été peu importantes à l'égard de l'hydroxyde ferrique, même au cours d'une dessiccation. Ces précipitations ont été beaucoup plus étendues au contact de l'hydroxyde d'aluminium, moins insoluble que l'hydroxyde ferrique ; la dessiccation les a considérablement accrues.

Les conséquences de ces diverses propriétés des adsorbants du sol sur l'alimentation phosphatée des plantes seront examinées dans une prochaine étude.

D. — APPENDICE
QUELQUES CARACTÈRES
DE LA DILUTION ISOTOPIQUE DES IONS PO_4.

Afin d'apporter quelques précisions à la connaissance des mécanismes de la dilution isotopique des ions phosphoriques, nous rassemblons ici diverses observations d'ordre cinétique, faites au cours de manipulations relatives à l'étude de la mobilité des ions PO_4 retenus par divers adsorbants. Nous examinerons successivement divers facteurs dont l'influence sur la vitesse de la dilution isotopique est soit nulle, soit importante.

1° Identité des cinétiques d'adsorption des ions $^{31}PO_4$ et $^{32}PO_4$.

Cette étude a été effectuée à l'aide d'hydroxyde ferrique colloïdal. Une solution contenant 16 mg ^{31}P et 10 μc ^{32}P a été additionnée, à un instant donné, de 2 grammes de $Fe(OH)_3$ (en suspension). Le mélange a été soumis à une vive agitation, et des portions ont été filtrées au bout de divers temps. Le tableau suivant indique les pourcentages de ^{31}P et ^{32}P restés dans la phase solution :

Temps en heures	^{31}P restant en solution	^{32}P restant en solution
0	100 %	100 %
0,2	55,6	56,7
0,4	51	54,4
1,1	50	49,3
3	49	47,4
48	48	48,2
216	45	43,5

L'hydroxyde ferrique a donc adsorbé une proportion identique des ions $^{31}PO_4$ et $^{32}PO_4$, et le rapport $^{31}P/^{32}P$ est resté identique dans les deux phases liquide et solide. Cette condition est indispensable à toute l'interprétation des mesures de vitesses de dilution isotopique.

2° La vitesse de la dilution isotopique est indépendante de la quantité de ^{32}P introduite.

Cette conclusion découle de la précédente, puisques les ions $^{31}PO_4$ et $^{42}PO_4$ tendent à se répartir de telle sorte que le rapport $^{31}P/^{32}P$ soit égal en tous les points du système. Une vérification expérimentale directe en a été rapportée précédemment (20).

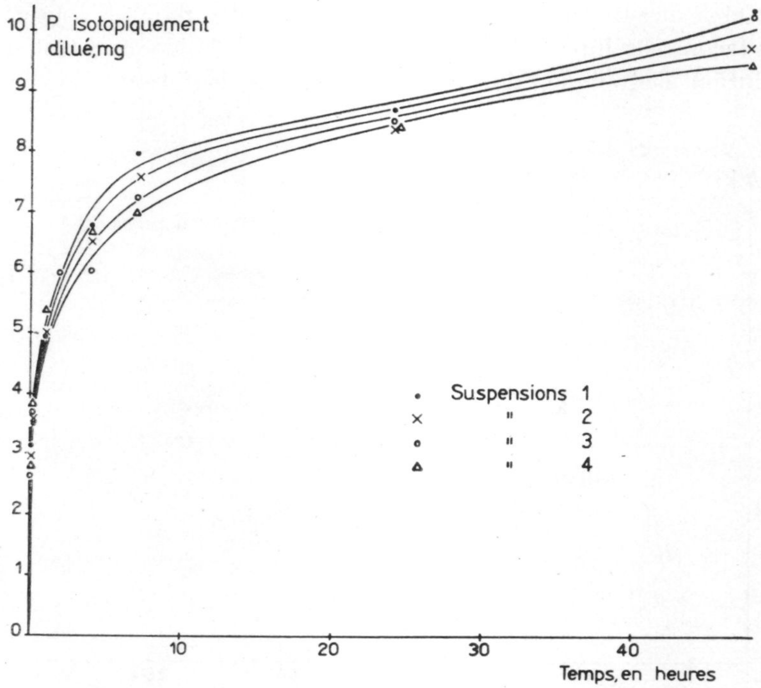
3° La dilution isotopique est indépendante de l'activité des ions PO_4 ; elle peut être assimilée à une réaction de diffusion.

Nous avons montré antérieurement que la vitesse de la dilution isotopique des ions PO_4 adsorbés par des argiles calciques est indépendante de leur activité (6). Une étude comparable a été reprise à l'aide d'hydroxyde d'aluminium, qui constitue un adsorbant beaucoup plus homogène. La dilution isotopique a été réalisée sur quatre suspensions, dont les caractéristiques étaient les suivantes :

N°	P adsorbé ‰ de Al $(OH)_3$	Concentration de la solution en équilibre mg P par litre
1	29,3	33
2	26,1	9,5
3	25	3
4	22,7	0,75

La force ionique de ces solutions était sensiblement constante (ClK 0,01 N) ; leurs concentrations en P variaient considérablement, et les quantités de P adsorbées restaient du même ordre de grandeur.

Le graphique 6 représente en fonction du temps les quantités de P isotopiquement diluées dans les quatre suspensions. On constate que, durant les premières heures, les courbes sont confondues ; elles se différencient peu à peu ensuite, selon les teneurs en P isotopiquement diluable. La concentration en P des solutions, c'est-à-dire sensiblement l'activité

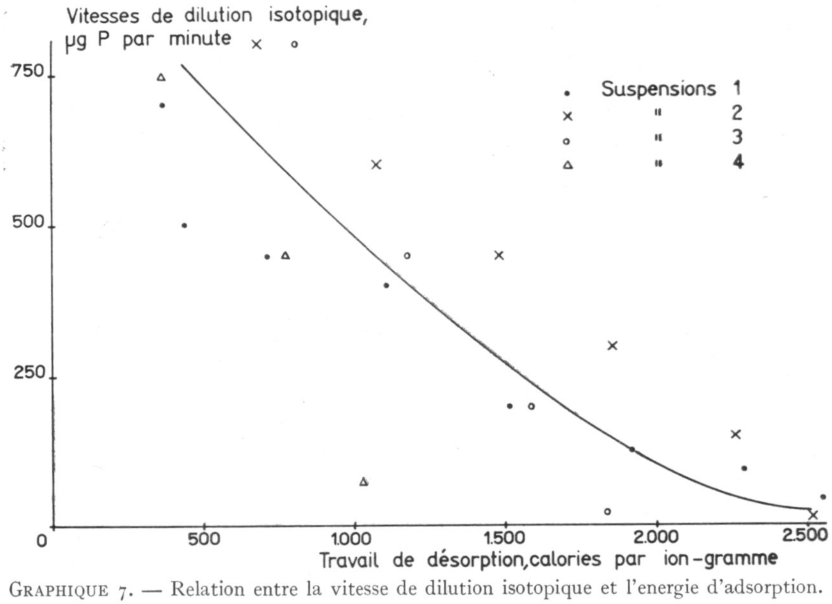


GRAPHIQUE 6. — Quantités de P isotopiquement diluées en fonction du temps, dans les quatre suspensions différentes.

à laquelle se trouvaient les ions PO_4 dans chacune des suspensions, n'a donc eu aucune influence sur la vitesse de leur dilution isotopique. A des concentrations ou des activités très différentes correspondent ici des vitesses de dilution isotopique égales, de même que, sur des argiles, à des activités égales correspondent des vitesses de dilution isotopique très différentes (6). Activité et vitesse de dilution isotopique ne sont donc pas liées.

La dilution isotopique se comporte ainsi comme une réaction de diffusion des ions $^{32}PO_4$ parmi les ions $^{31}PO_4$ adsorbés. Ce n'est pas un phénomène d'échange, comme pourrait le laisser croire le terme encore utilisé d' « échanges isotopiques ».

La relation assez lâche mais définie entre la vitesse de dilution isotopique et l'énergie d'adsorption, mise en évidence dans l'étude des argiles et des sols (6), apparaît de nouveau ici (graphique 7). Toutefois, si l'on compare les graphiques 6 et 7, on constate que les courbes sont mieux groupées sur le graphique 6, qui ne fait appel qu'à la diffusion des ions $^{32}PO_4$ parmi les ions $^{31}PO_4$ adsorbés. La relation entre vitesse de dilution isotopique et énergie d'adsorption peut donc être en partie fortuite : l'énergie d'adsorption va croissant au fur et à mesure que l'on extrait des ions PO_4 (6), de même que la vitesse de dilution isotopique diminue au fur et à mesure que la réaction s'avance. Cette relation conserve de toutes façons son intérêt appliqué : elle permet, à l'aide d'un test simple de dilution isotopique, d'estimer l'énergie d'adsorption.



GRAPHIQUE 7. — Relation entre la vitesse de dilution isotopique et l'energie d'adsorption.

4° Influence de la température sur la vitesse de dilution isotopique.

L'influence de la température sur la vitesse de la dilution isotopique des ions PO_4 dans le sol a déjà été signalée (20). Quelques essais ont été effectués également sur l'hydroxyde d'aluminium ; les résultats sont indiqués par le graphique 8. On constate que la vitesse de la dilution isotopique est presque doublée lorsque la température s'élève de 20° à 55° ; dans le sol, cette influence est du même ordre de grandeur (20).

On peut tirer de ces données quelques indications relatives à l'énergie d'activation de la dilution isotopique, c'est-à-dire à la quantité d'énergie

que doivent accumuler les ions $^{32}PO_4$ pour pouvoir se mêler aux ions $^{31}PO_4$ adsorbés.

Si l'on assimile la dilution isotopique à une diffusion, le coefficient de diffusion D des ions $^{32}PO_4$ est de la forme (21) :

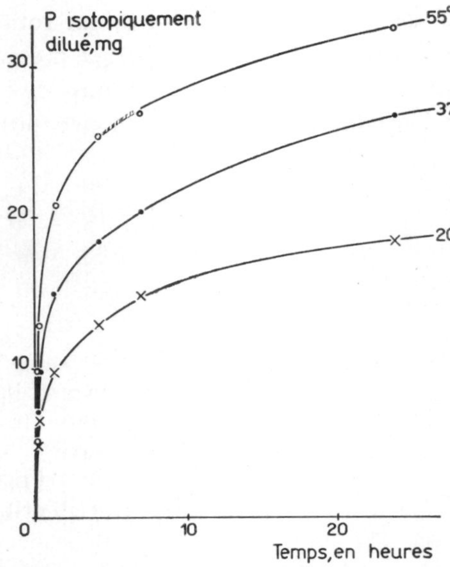
$D = A \exp(-Q/RT)$ où

A : constante indépendante de la température.

Q : énergie d'activation.

R : constante des gaz.

T : température absolue.



GRAPHIQUE 8. — Influence de la température sur la vitesse de dilution isotopique.

La variation, en fonction de la température, du coefficient de diffusion D permet donc de déterminer l'énergie d'activation Q. En première approximation, l'expression est ici (21) :

$$Q = RT^2 \frac{d\ln D}{dT}.$$

D est lui-même directement proportionnel à la vitesse de dilution isotopique mesurée expérimentalement ; le rapport des vitesses mesurées à diverses températures est égal au rapport des coefficients de diffusion D à ces mêmes températures (22). On peut donc ainsi faire le calcul approximatif de l'énergie d'activation Q. Les valeurs trouvées ici sont de l'ordre de 4 000 calories par ion-gramme $^{32}PO_4$; elles sont relativement faibles, indiquant qu'aucune barrière énergétique importante ne limite la diffusion de ces ions au contact de l'adsorbant (21).

5° Autres facteurs agissant sur la dilution isotopique.

Parmi ces facteurs divers, il importe de signaler notamment l'agitation des suspensions, et la taille des particules adsorbantes. Nous n'avons pas effectué de mesures précises concernant l'influence du rythme d'agitation des suspensions sur la vitesse de dilution isotopique, mais, au cours des manipulations, cette influence apparaît grande. Nous utilisons autant que possible des agitateurs électromagnétiques tournant à grande vitesse. Lorsque leur emploi est irréalisable (hydroxydes ferriques purs, sols tropicaux très ferrugineux), les suspensions sont d'abord agitées très vivement à la main, puis placées sur un agitateur rotatif. La taille des particules est également importante, son influence a été mise en évidence dans le cas des sols (20). Plus elles sont fines, et plus l'agitation est intense, mieux les surfaces adsorbantes sont en contact avec les ions $^{32}PO_4$ de la phase solution.

6° Conclusions.

La dilution isotopique des ions PO_4 adsorbés peut être assimilée à une réaction de diffusion. Sa vitesse est indépendante de l'activité des ions PO_4 ; elle dépend par contre de la température, quoique l'énergie d'activation de cette diffusion paraisse assez faible. La petite différence de masse des ions $^{31}PO_4$ et $^{32}PO_4$ ne modifie pas leur cinétique d'adsorption.

RÉSUMÉ

L'hydroxyde ferrique colloïdal et surtout l'hydroxyde d'aluminium manifestent à l'égard des ions PO_4 un pouvoir adsorbant beaucoup plus élevé que celui des argiles calciques. De faibles précipitations de phosphates ferriques interviennent aucours de la dessiccation des composés d'adsorption Fe $(OH)_3$-PO_4. Au contact de l'hydroxyde d'aluminium, les précipitations de phosphates aluminiques sont beaucoup plus importantes.

La cinétique de la dilution isotopique des ions PO_4 adsorbés par les hydroxydes métalliques ou par les argiles calciques est comparable dans l'ensemble. Toutefois, chez les argiles calciques, les ions PO_4 retenus par l'intermédiaire des ions Ca sont beaucoup plus mobiles que les ions PO_4 retenus par les atomes d'Al de la surface du réseau.

La dilution isotopique des ions PO_4 adsorbés peut être considérée comme une réaction de diffusion, indépendante de l'activité de ces ions. L'énergie d'activation de la diffusion est faible.

SUMMARY

Colloidal ferric hydroxide and especially aluminium hydroxide possess a much higher capacity of adsorbing PO_4 ions than calcareous clays do. Weak precipitations of ferric phosphates occur during drying of the adsorption products Fe $(OH)_3$-PO_4. At a contact with aluminium hydroxide, the amounts of aluminium-phosphate precipitates are much greater.

The kinetics and isotopic dilution of PO_4 ions adsorbed by metal hydroxides are similar to those of PO_4 ions adsorbed by calcareous clays. Nevertheless, the PO_4 ions retained by means of Ca ions in calcareous clays are much more mobile than PO_4 ions retained by Al on the surface of the lattice.

The isotopic dilution of adsorbed PO_4 ions may be considered as a reaction of diffusion independent of the activity of these ions. The activation energy of the diffusion is small.

ZUSAMMENFASSUNG

Isotopische Adsorption und Verdünnung der Phosphorsäure-Ionen in kontakt mit Metallhydroxyde und Tone.

Im Gegensatz zu kalkhaltigen Tonen zeigten das kolloïdale Ferri-Hydroxyd und besonders das Aluminiumhydroxyd ein viel höheres Adsorptionsvermögen gegenüber PO_4-Ionen. Im Verlaufe der Trocknung von $Fe(OH)_3$-PO_4^- Adsorptionskomplexen treten geringe Ferri-Phosphatausfällungen ein. In Kontakt mit Aluminiumhydroxyd, sind die Aluminium-Phosphatausfällungen viel bedeutender.

Das Gesamtbild der Kinetik der isotopischen Verdünnung von adsorbierten PO_4-Ionen durch metallische Hydroxyde oder kalkhaltigen Tone ist vergleichbar.

Dennoch, bei kalkhaltigen Tonen, sind die durch Ca-Ionen zurückgehaltenen PO_4-Ionen viel beweglicher, als jene die durch die Al-Atome der Gitterflächen festgehalten werden.

Man kann die isotopische Verdünnung der adsorbierten PO_4-Ionen als eine von der Aktivität dieser Ionen unabhängigen Diffusionsreaktion betrachten. Die Aktivierungsenergie der Verdünnung ist gering.

Адсорбция и изотопическое разведение фосфорнокислых ионов при соприкосновении с окислами металлов и с глинами.

Р. БЛЯНШЕ. (Шатору.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Коллоидальный гидроксид трехвалентного железа и в особенности гидроксид алюминия обнаруживают по отношению к ионам PO_4 адсорбирующую способность значительно более высокую чем глины насыщенные кальцием. Слабые выпадения осадков фосфорнокислого трехвалентного железа происходят в течение высушивания соединений адсорбции Fe $(OH)_3$-PO_4. При соприкосновении с гидроксидом алюминия, осаждения фосфатов алюминия много более значительны.

Кинетика изотопического разведения ионов PO_4 адсорбированных металлическими гидроксидами или глинами насыщенными кальцием в общем сравнима. Тем не менее, у глин насыщенных кальцием ионы PO_4 удержанные при посредстве ионов Ca^{++} значительно более подвижны, чем ионы PO_4 удержанные атомами алюминия поверхности сети.

Изотопическое разведение адсорбированных ионов PO_4 может рассматриваться как реакция диффузии, независимая от активности этих ионов. Энергия возбуждения диффузии слаба.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) BARBIER (G.), CHABANNES (J.) et MIALLET (P.). — Absorption des ions phosphoriques à la surface des colloïdes argileux par l'intermédiaire des alcalino-terreux. *Ann. Agro.*, **1**, 7-33, 1946.

(2) CHAMINADE (R.). — Nouvelles recherches sur les composés phosphohumiques. *Ann. Agro.*, **3**, 229-240, 1946.

(3) BOISCHOT (P.), COPPENET (M.) et HÉBERT (J.). — Fixation de l'ion phosphorique sur les sables calcaires des sols. *Ann. Agro.*, **1**, 103-112, 1949.

(4) ANTIPOV-KARATAEV (I. N.). — Emploi de la méthode isotopique pour l'étude des phénomènes d'adsorption des électrolytes par les sols aux fins d'amélioration des sols. *Util. Energie Atomique*, **12**, 147-155, 1955.

(5) WEY (R.). — Étude de la rétention des anions phosphoriques par les argiles. *Ann. Agro.*, **1**, 1-62, 1956.

(6) BLANCHET (R.). — Énergie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes, Première partie. A paraître *Ann. Agro.*

(7) WILLIAMS (E. G.), SCOTT (N. M.) et MC DONALD (M. J.). — Soil properties and phosphate sorption, *J. Sc. Food Agric.*, **9**, 551-559, 1958.

(8) WILLIAMS (E. G.). — Influence of parent material and drainage conditions on soil phosphorus relationships. *Commun. Symp. Int. Univ. Pise*, 1958, en cours d'impression.

(9) GONZALEZ GARCIA (F.) and Tristan MATOS (F.). — Factors in the fixation of phosphorus by calcareous soils. *C. R. VI*e *Cong. Int. Sc. Sol.*, Paris, B, 609-617, 1956.

(10) BLANCHET (R.). — Adsorption et dilution isotopique des ions phosphoriques au contact des hydroxydes ferriques. *C. R. Ac. Sc.*, **248**, 1028-1031, 1959.

(11) BARBIER (G.). — Introduction à l'étude des phosphates du sol. *C. R. VI*e *Cong. Int. Sc. Sol*, Paris, B, 387-402, 1956.

(12) BLANCHET (R.). — Pouvoir adsorbant des divers constituants du sol à l'égard des ions phosphoriques et examen des réserves des terres. *C. R. Ac. Agri.*, **6**, 247-252, 1959.

(13) RUSSEL (R. S.), RUSSEL (E. W.), MARAIS (P. G.) et FOSTER (W. N. M.). — Facteurs influençant l'assimilabilité de l'acide phosphorique des sols par les plantes. *Util. Energie Atomique*, **12**, 118-123, 1959.

(14) NYE (P. H.) et FOSTER (W. N. M.). — Do plants vary in their ability to utilize less readily available soil phosphate. *C. R. VI*e *Cong. Int. Sc. Sol*, Paris, D, 257-262, 1956.

(15) AMER (F.), BOULDIN (D. R.), BLACK (C. A.) and DUKE (F. R.). — *Plant and Soil*, **6**, 391-408, 1955.

(16) CHARLOT (G.) et BÉZIER (D.). — Analyse quantitative minérale, Masson, Paris, 379, 1955.

(17) LUGO (P.). — Contributo alla valutazione del contenuto et del fabbisogno fosfatico di alcuni terreni italiani. *Com. Symp. Int. Univ. Pise*, 1958, en cours d'impression.

(18) DEMOLON (A.), BOISCHOT (P.) et LAJON (J.). — Réaction des divers sols à l'apport des engrais phosphatés solubles. *Ann. Agro.*, **3**, 291-330, 1953.

(19) ROBICHET (O.). — Recherches sur les oxydes de fer et de manganèse dans les sols. *Ann. Agro.*, **4**, 511-572, 1957.

(20) BLANCHET (R.). — Énergie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes. Deuxième Partie. *Ann. Agro.*, en cours d'impression.

(21) JOST (W.). — Diffusion, Academic Press, New York, 468, 1952.

(22) BENARD (J.) et LAURENT (J. F.). — Étude de l'autodiffusion des ions dans les halogénurées alcalins mono- et polycristallins à l'aide des radioisotopes. Conf. Radioisot. *In Scient. Res.*, Paris, **1**, 557-597, 1957.

631. 414. 3 : 546. 56.

ÉCHANGES DES IONS CUIVRIQUES SUR LES COLLOIDES MINÉRAUX

I. — PHÉNOMÈNES D'ADSORPTION

PAR

J. MULLER

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale, Antibes.

PLAN DU MÉMOIRE

— **Introduction.**

— **Conditions expérimentales et techniques utilisées.**

— **Discussion des résultats.**
- — Isothermes d'adsorption.
- — Valence du cuivre et adsorption.
- — Influence du pH sur l'adsorption.

— **Conclusions.**

INTRODUCTION

L'utilisation par l'agriculture de produits phyto-sanitaires à base de sels de cuivre, pour la protection des vergers et des vignobles, a abouti à un enrichissement en cuivre souvent considérable de la couche superficielle du sol. Des phénomènes de toxicité peuvent apparaître lors de la reconversion des plantations pérennes à enracinement profond, en cultures annuelles florales ou maraîchères dont l'enracinement est beaucoup plus superficiel.

Ce travail sur le comportement du cuivre en présence de différents colloïdes minéraux, a été entrepris en vue de fournir des données complémentaires aux études entreprises à la Station d'Agronomie d'Antibes sur la toxicité du cuivre dans les sols acides (DROUINEAU et MAZOYER, 1953-1956) (9). Dans la première partie de cette étude nous nous sommes

efforcés de préciser les phénomènes d'adsorption que les ions cuivriques pouvaient présenter sur différents échangeurs naturels ou de synthèse.

Dans les sols argilo-calcaires, le cuivre est bloqué superficiellement sous forme d'hydroxydes précipités (Boischot et Quillon, 1952) (4). Dans les sols riches en matière organique, le cuivre est complexé par la matière organique (Schlichting, 1957) (21) (Broadbent et Ott, 1957) (5). Mais on manque de données sur son comportement dans les sols acides, pauvres en matière organique où les phénomènes d'échange sont prédominants.

Ce sont les travaux de Jamison (1942) (14) qui ont mis en évidence pour la première fois, la possibilité d'adsorption et de fixation du cuivre par les sols sableux. Demumbrum et Jackson (1956) (7) démontrent la possibilité d'échanges des ions Ca^{2+} contre Cu^{2+} et Zn^{2+} sur les colloïdes argileux à partir de solutions neutres diluées.

D'après Mitchell (in Bear, E. 1955) (2) l'ordre de difficultés croissantes pour le déplacement de quelques cations oligoéléments, comparés à des cations d'éléments majeurs, serait le suivant :

$$Ca < Ba < Zn < Cu.$$

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES ET TECHNIQUES UTILISÉES

Les essais ont porté sur 5 types de particules adsorbantes : une résine synthétique : l'Amberlite IR 120 ; 2 argiles minéralogiques : une montmorillonite de Camp Bertaud (Maroc) et une Kaolinite de Djebel-Debar (Algérie) ; 2 argiles extraites de « Terre Rouge « provenant de la région de Grasse : argile P_1 « terre rouge » sur calcaire jurassique et argile P_2 « terre rouge » sur muschelkalk, composées essentiellement d'un mélange de kaolinite et d'illite.

Pour étudier l'adsorption des sels de cuivre sur ces différents matériaux nous n'avons retenu que les particules argileuses de diamètre inférieure à 1 μ, séparées par sédimentation. La purification et la préparation sous une forme donnée : forme H et forme Ca est effectuée suivant la technique préconisée par Morel (1957) (18).

Afin d'éviter la libération éventuelle d'ions Al à partir de l'aluminium de constitution des argiles, ce qui risque de se produire en conservant les argiles sous forme acide, nous avons utilisé la technique préconisée par Aldrich et Buchanan (1958) (1).

Après purification des argiles, on transforme sous forme Na les argiles acides, par traitement avec ClNa 1, N et lessivage des sels solubles en excès sur une membrane à dialyse. Les argiles H s'obtiennent alors par passage sur une colonne de résine H.

Conditions d'expérience. — Une suspension concentrée d'argile, contenant environ 150 à 200 mg de colloïdes est mise dans un tube à centrifuger en présence de solutions de sels de cuivre (sulfate et acétate) dont les concentrations sont comprises entre 1×10^{-2} mg Cu/cm³ et 1,5 mg Cu/cm³, soit approximativement entre 50 et 7 500 ppm de cuivre. Le volume final de l'essai est ajusté à 50 cm³ et l'essai est soumis à agitation pendant 18 heures à la température du laboratoire.

Les dosages sont effectués sur le liquide surnageant.

Le culot de centrifugation sert à déterminer la quantité exacte de particules utilisées dans chaque essai.

Sur le liquide surnageant on détermine :

Le pH par potentiométrie à l'électrode de verre.

Le cuivre est dosé colorimétriquement par la méthode mise au point à la Station (MAZOYER, 1958) (15). La différence de concentration entre la concentration initiale et la concentration finale permet de calculer la quantité adsorbée.

Le calcium désorbé est dosé au photomètre de flamme.

DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'adsorption des ions Cu est étudiée en présence de différents sels de cuivre : sulfate et acétate, l'intervalle de concentration étant compris entre 1×10^{-2} et 1,5 mg Cu/cm³.

Dans les conditions indiquées précédemment nous avons vérifié l'existence des isothermes d'adsorption des ions Cu^{+2} sur les différents types de particules en présence de SO_4Cu, $5H_2O$.

Amberlite IR 120 forme Ca.

Kaolinite forme Ca.

Montmorillonite forme Ca.

Argile P_1 forme Ca.

Argile P_2 forme Ca.

Protocole d'établissement des isothermes d'adsorption

Particules sous forme Ca, suspension à 20 mg/cm³ amené au pH de la solution de SO_4Cu, $5H_2O$ par addition de Ca $(OH)_2$ N/250 environ.

Addition de SO_4Cu, $5H_2O$ de manière à réaliser un intervalle de concentration compris entre 1×10^{-2} et 1,5 mg Cu/cm³.

Volume de l'essai amené à 50 cm³. Agitation pendant 18 heures à la température du laboratoire et séparation par centrifugation de la phase liquide et de la phase solide.

Dans le tableau suivant nous avons résumé quelques-unes des propriétés physico-chimiques des échangeurs utilisés.

Particules	pH avant add.$Ca(OH)_2$	Capacité d'échange à pH = 7,0 m. e./ 1g	% de saturation à pH = 5,0 en Cu^{2+}	en Ca^{2+}
—	—	—	—	—
IR 120	4,4	4,50	87	87
Kaolinite	5,2	1,45	55	28
Montmorillonite ..	5,1	10,5	37	37
Argile P_1	4,7	4,10	48	39
Argile P_2	5,1	3,60	49	37

La capacité d'échange est déterminée par Ac (NH^4) N/1 à pH = 7,0.

Le pourcentage de saturation en Cu^{2+} et Ca^{2+} est déterminé par adsorption à pH = 5,0 de SO_4Cu 0,1 N et de Cl_2Ca 0,1 N sur chacune des particules étudiées. Le pourcentage de saturation en Cu^{2+} à pH = 5,0 est toujours plus fort que le pourcentage en Ca^{2+} sauf pour l'amberlite et la montmorillonite. Des variations analogues de la capacité d'échange déterminée soit à partir de l'acétate d'ammonium, soit à partir de l'acétate de cuivre, ont déjà été observées par JAMISON (1956) (14). Les plus faibles pourcentages de saturation s'observant pour les sols où les échangeurs minéraux ont la plus forte capacité d'échange déterminée à l'acétate d'ammonium.

Dans l'intervalle de concentration étudié, les données expérimentales présentées dans le tableau I trouvent une représentation satisfaisante dans l'équation proposée par Freundlich pour décrire l'isotherme d'adsorption :

$$\frac{x}{m} = kc^{1ln}$$

où x et m sont les masses respectives de substance adsorbée et adsorbante, c la concentration de la solution à l'équilibre et n et k des constantes dépendant de la température et de la nature des substances en présence :

Cette équation sous entendant que si l'on porte Log $\frac{x}{m}$ en fonction de Log c, on obtiendra une droite de pente $1/n$.

$$\text{Log}\,\frac{x}{m} = \text{Log}\,k + \frac{1}{n}\log c.$$

Ce qui est vérifié sur le graphique n° 1.

TABLEAU I

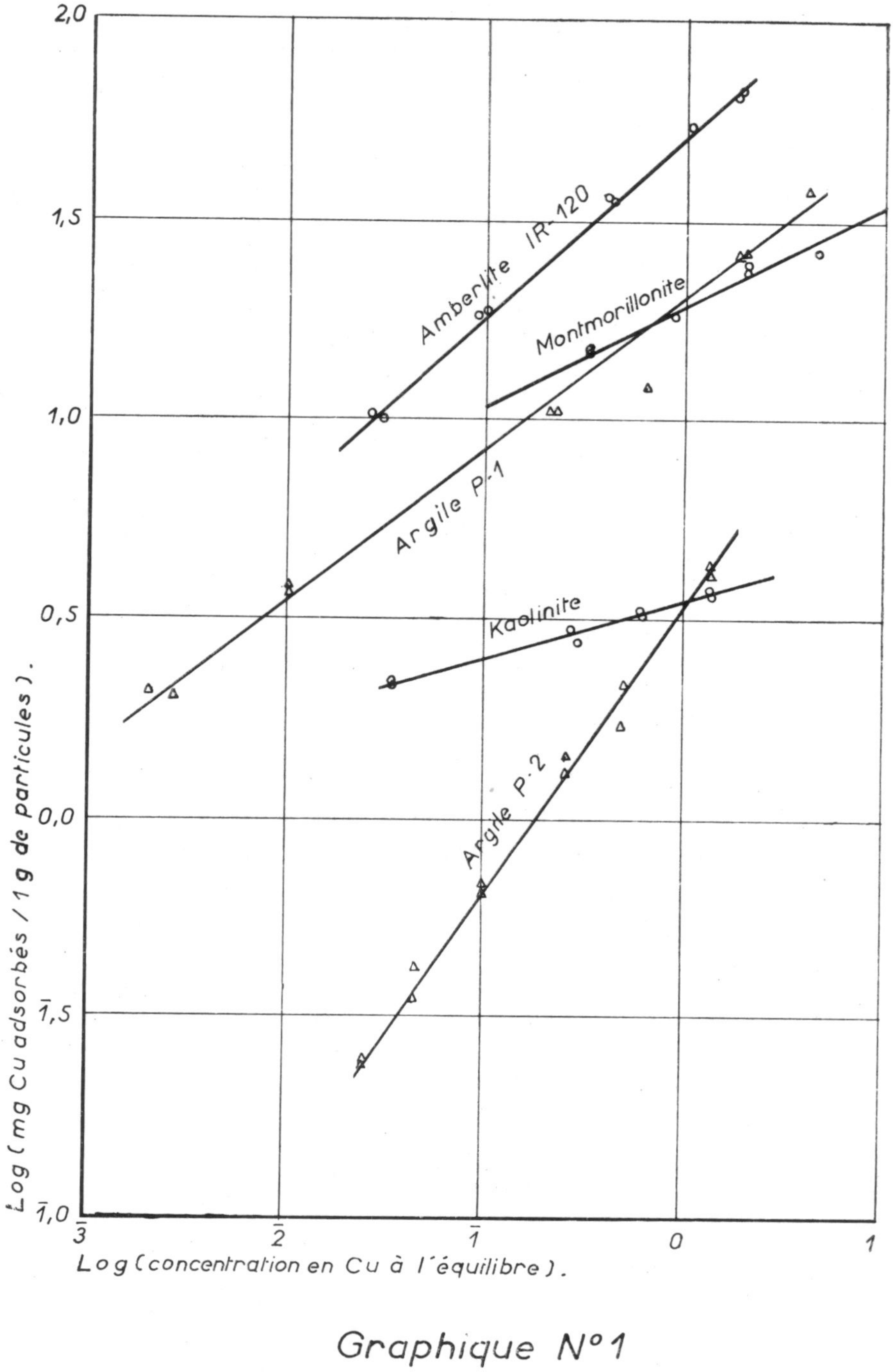
Adsorption des ions Cu^{2+} sur les colloïdes minéraux.
Résultats calculés pour 1 g de particules.

pH à l'équilibre	Concentration initiale en Cu (mg/cm³)	à l'équilibre	mg Cu adsorbé
	Amberlite IR 120 forme Ca		
4,75	0,093	0,007	4,29
4,50	0,230	0,028	10,1
4,60	0,467	0,093	18,6
4,90	1,135	0,410	36,2
4,80	2,16	1,08	53,6
4,70	3,21	1,93	65,2
	Montmorillonite forme Ca		
—	0,622	0,324	14,9
—	1,24	0,875	18,4
—	2,44	2,01	24,5
—	5,00	4,46	26,0
	Kaolinite forme Ca		
4,60	0,079	0,035	2,20
4,60	0,168	0,102	2,50
4,45	0,336	0,279	2,87
4,35	0,690	0,626	3,2
4,25	1,47	1,39	3,9
	Argile P_1 forme Ca		
5,45	0,0089	traces	0,445
5,45	0,0437	0,0024	2,07
5,30	0,0880	0,0113	3,84
5,10	0,436	0,228	10,5
5,20	0,895	0,658	14,0
5,30	2,42	1,90	26,2
5,30	4,80	4,26	27,3
	Argile P_2 forme Ca		
5,05	0,0291	0,0243	0,240
5,05	0,0530	0,0450	0,386
5,05	0,112	0,095	0,673
5,05	0,163	0,146	0,852
5,05	1,285	0,258	1,39
5,05	0,530	0,490	1,94
5,0	1,44	1,36	4,14

Les coefficients de l'équation de Freundlich, dans ces conditions prennent les valeurs suivantes :

Particules	k	1/n
Amberlite IR 120	52,0	0,46
Kaolinite	19,3	0,26
Montmorillonite	3,63	0,15
Argile P_1	20,4	0,36
Argile P_2	3,39	0,72

La comparaison des quantités de Cu^{2+} adsorbées, calculées à partir de l'équation de Freundlich donne une correspondance satisfaisante avec les valeurs déterminées expérimentalement.



Graphique N° 1

La concordance entre les valeurs déterminées expérimentalement et celles calculées à partir de la loi de Freundlich peut s'expliquer par le fait que les échanges se font entre ions de même valence : Ca bivalent contre Cu bivalent, qui dans les conditions expérimentales, est l'espèce ionique la plus importante, ainsi que nous le verrons dans le paragraphe suivant.

Amberlite IR-120.

Concentration en Cu^{2+} à l'équilibre (mg/cm^3)	mg Cu^{2+} adsorbés pour 1 g de particules.	
	valeur mesurée	valeur calculée
—	—	—
0,007	4,29	5,30
0,028	10,1	10,0
0,093	18,6	17,4
0,41	36,2	34,4
1,08	59,6	53,8
1,92	65,2	70,0

Argile P_2.

0,024	0,230	0,240
0,046	0,364	0,386
0,098	0,645	0,673
0,140	0,850	0,852
0,258	1,15	1,39
0,490	2,02	1,94
1,36	4,22	4,14

Valence du Cuivre et adsorption

Nous rappellerons d'abord brièvement les propriétés des solutions de sels de cuivre.

Les ions Cuivre peuvent exister essentiellement sous deux états de valence : mono et bivalent, mais en fait la forme monovalente est très peu importante en solution, d'une part parce que les ions Cu^+ monovalents sont des réducteurs énergiques, oxydés par l'oxygène atmosphérique ou contenu dans l'eau, d'autre part parce que l'étude de la constante de dissociation de Cu^+ en Cu^{2+} montre que les ions Cu^+ ne peuvent exister en solution pour une concentration supérieure au 1/140 de la concentration en cuivre total de la solution (PASCAL, 1957) (20).

L'adsorption du cuivre sur les colloïdes minéraux est donc à envisager essentiellement sous deux formes :

— sous formes d'ions cuivriques bivalents Cu^{2+},

— sous forme d'ions monovalents : ions complexes de type CuX^+ où le radical X peut représenter, soit un radical d'acide organique (acide acétique par exemple), soit le radical minéral OH^-.

L'hydrolyse des ions Cu^{2+} se ferait alors suivant la réaction proposée par MENZEL et JACKSON (1950) (16) :

$$Cu^{2+} + H_2O \rightleftarrows Cu(OH)^+ + H^+.$$

La connaissance de la constante d'hydrolyse du cuivre permet de calculer le taux de dissociation du cuivre bivalent dans une solution de pH donné (DEMUMBRUN et JACKSON, 1958)

$$\frac{Cu(OH)^{+} \times (H)^{+}}{Cu^{2+}} = 10^{-8}$$

la variation des rapports ioniques en fonction du pH est alors la suivante :

pH	$Cu^{2+}/CuOH^{+}$
2	10^6
3	10^5
4	10^4
5	10^3
6	10^2
7	10
8	1

Il en résulte que pour des valeurs de pH inférieur à 6, $Cu^{2+}/Cu\,(OH)^{+} > 10^2$ donc que les ions Cu^{2+} sont l'espèce ionique la plus importante en solution.

Dans le cas d'ions complexes organiques nous avons cherché à préciser le taux de dissociation en ions Cu^{2+} et CuX^{+}. Les essais ont porté sur l'étude de l'adsorption des ions Cu^{2+} et CuX^{+} d'une solution d'acétate de cuivre sur l'Amberlite IR 120.

Si l'on admet l'échange stœchiométrique des ions Ca^{2+} contre Cu^{2+} et CuX^{+}, l'étude de la désorption des ions Ca^{2+} et de l'adsorption des ions Cu^{2+} et CuX^{+} permet de calculer les quantités respectives CuX^{+} et Cu^{2+} correspondant à la désorption d'une quantité donnée de Ca^{2+}.

x représentant le nombre de milliéquivalents de $CuAc^{+}$ (*) adsorbés et y le nombre de milliéquivalents de Cu^{2+} adsorbés, nous avons la relation :

(1) $(x \text{ m. e. } CuX^{+} + y \text{ m .e. } Cu^{2+})$ adsorbé $= (a \text{ m. e. } Ca^{2+})$ désorbés.

D'autre part, le *bis*-cyclo-hexanone oxalyldihydrazone utilisé pour le dosage colorimétrique du cuivre, fixe en milieu alcalin les ions cuivreux et cuivriques sous forme d'un complexe coloré stable (NILSON, G. and al.) (19).

Nous pouvons écrire :

(2) $$x\frac{(\text{masse mol. Cu})}{1} + y\frac{(\text{masse mol. Cu})}{2} = b \text{ mg Cu absorbé,}$$

les équations (1) et (2) permettent alors de calculer les quantités x et y.

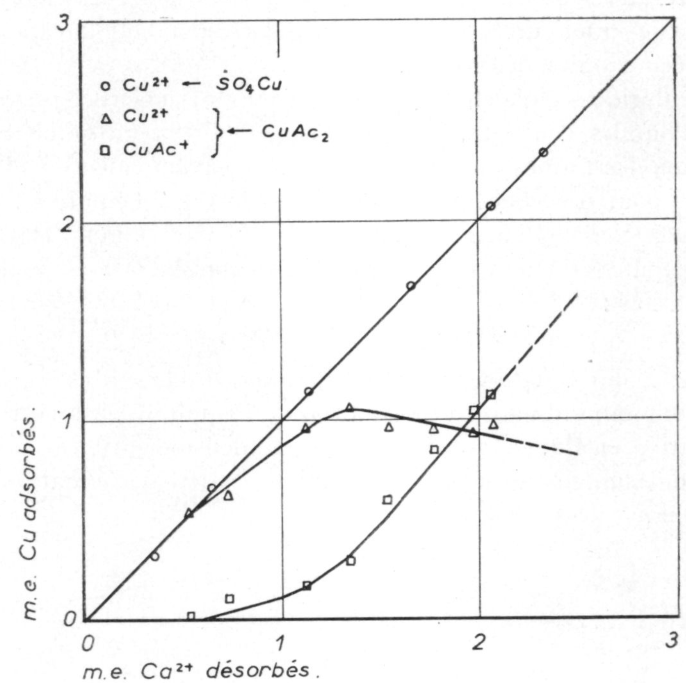
En opérant avec $SO_4Cu,5H_2O$, qui se dissocie uniquement en SO_4^{2-} et Cu^{2+} (pH à l'équilibre compris entre 4,5 et 4,8), l'équation se réduit à :

$$y \text{ m. e. } Cu^{2+} = a \text{ m. e. } Ca^{2+}.$$

(*) Dans la suite du texte le radical Ac^{-} désignera l'anion acétique.

Le nombre de m. e. Cu^{2+} adsorbés doit donc être égal au nombre de m. e. Ca^{2+} désorbés, ce qui est vérifié avec une approximation satisfaisante dans le tableau suivant :

Concentration en Cu à l'équilibre mg/cm³	mg Cu adsorbés	m. e. Ca^{2+} désorbés	m. e. Cu^{2+} adsorbés valeur calculée	m. e. Cu^{2+} adsorbés valeur mesurée
0,028	10,1	0,363	0,363	0,318
0,093	21,0	0,650	0,650	0,660
0,410	36,2	1,135	1,135	1,14
1,08	53,6	1,66	1,66	1,69
1,93	65,6	2,07	2,07	2,06
3,68	74,0	2,34	2,34	2,33



Graphique N° 2

Nous pouvons appliquer les équations (1) et (2) pour calculer les quantités respectives de $CuAc^+$ et Cu^{2+} correspondant à la désorption d'une quantité donnée de Ca.

On sait, en effet, qu'en solution, la dissociation de l'acétate de cuivre se fait en deux échelons suivant la réaction (PASCAL, 1957) (20) :

$$CuAc_2 \rightleftarrows CuAc^+ + Ac^-$$
$$CuAc^+ \rightleftarrows Cu^{2+} + Ac^-.$$

Avec le système IR-120 $CuAc_2$ nous avons les résultats suivants :

Concentration en Cu à l'équilibre mg/cm³	mg Cu adsorbés	m. e. Ca^{2+} désorbés	m. e. Cu Ac^{+} adsorbés	m. e. Cu^{2+} adsorbés
0,056	15,6	0,519	0,0	0,519
0,460	26,7	0,734	0,106	0,628
0,670	40,7	1,12	0,160	0,960
1,32	51,1	1,35	0,290	1,06
2,22	67,8	1,54	0,591	0,951
3,26	83,6	1,79	0,840	0,950
4,45	95,6	1,98	1,05	0,932
5,52	105,5	2,07	1,11	0,960

Ces résultats montrent que pour les faibles concentrations en Cu, concentration inférieure à 0,056 mg/cm³, correspondant dans les conditions expérimentales décrites précédemment à 300 p. p. m. de Cuivre, les ions cuivriques bivalents sont l'espèce ionique adsorbée préférentiellement. Pour les concentrations supérieures, il y a un équilibre entre l'adsorption des formes Cu^{2+} et $CuAc^{+}$, la forme monovalente s'adsorbant davantage pour des concentrations élevées de Cu à l'équilibre.

Nous retrouvons ainsi le fait déjà signalé par DOUCET et COGNIAC (1955) (8) qui considèrent que pour les fortes concentrations, seule a lieu la dissociation :

$$CuAc_2 \rightleftarrows CuAc^{+} + Ac^{-}.$$

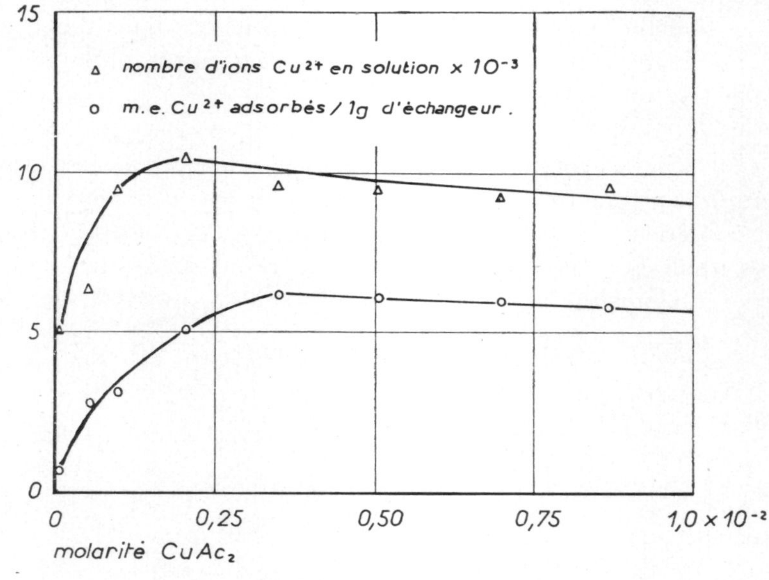
A partir des équations proposées par ces auteurs, il est possible de calculer le nombre d'ions Cu^{2+} en solution à l'équilibre en fonction de la concentration en Cu. On notera alors le parallélisme entre ces valeurs et le nombre de m. e. Cu^{2+} adsorbés, calculés à partir des équations (1) et (2). Graphique n° 3.

Molarité Cu Ac_2	Nombre d'ions Cu^{2+} en solution $\times 10^{-3}$	m. e. Cu^{2+} adsorbés/1 g d'échangeur
—	—	—
$8,80 \times 10^{-4}$	0,675	0,519
$7,25 \times 10^{-3}$	2,57	0,628
$1,05 \times 10^{-2}$	3,07	0,960
$2,08 \times 10^{-2}$	5,05	1,06
$3,50 \times 10^{-2}$	6,32	0,951
$5,12 \times 10^{-2}$	6,15	0,950
$7,00 \times 10^{-2}$	5,95	0,932
$8,70 \times 10^{-2}$	5,80	0,960

Du point de vue pratique ce résultat est important car il montre qu'une même quantité de cuivre, suivant qu'elle est engagée sous forme de Cu^{2+} bivalent, ou sous forme de complexe CuX^{+} monovalent, sera retenue par le complexe adsorbant dans un rapport variant du simple au double : un m. e. de Cu monovalent ou bivalent s'échangeant contre un m. e. de Ca^{2+}, mais un m. e. de Cu monovalent correspondant à 63,5 mg de Cu retenu dans un cas contre 31,8 mg dans l'autre.

Influence du pH sur l'adsorption. — Pour étudier l'influence du pH sur les échanges entre une argile -Ca (argile P_2) et une solution de sels de Cuivre ($SO_4Cu\ 5H_2O$) nous avons établi les isothermes d'adsorption du cuivre en réalisant, au moyen d'une solution tampon d'acide acétique (0,1 N) et d'acétate de calcium (0,1N) des solutions ayant une valeur de pH maintenue constante pendant que se produisent les échanges. En effet en milieu non tamponné le pH varie en même temps que se produisent les réactions d'échanges. MENZEL et JACKSON (1950) (17) ont montré qu'en présence d'échangeurs minéraux pendant la réaction d'échange le pH varie suivant la réaction :

$$Cu^{2+} \pm H_2O \rightleftarrows Cu(OH)^+ + H^+.$$



Graphique N°3

En étudiant l'équilibre d'une solution de sels de Cuivre (acétate-chlorates) avec une argile K, ces auteurs ont montré que l'adsorption des ions Cu était accompagnée d'une augmentation de concentrations en ions H, que le nombre de m. e. de cuivre adsorbé par l'argile était supérieur au nombre de m. e. de potassium désorbé.

A ce fait d'observation on pourrait voir deux explications :

Primo, comme nous l'avons vu précédemment l'acétate de cuivre se dissocie en deux ions de valence différente : $CuAc^+$ monovalent et Cu^{2+} bivalent. Lorsque l'on exprime en milliéquivalent les quantités de Cu adsorbé en fonction du cation désorbé, il faut tenir compte

du fait que la désorption d'un milliéquivalent de Ca^{2+}, par exemple, peut aussi bien provenir de l'adsorption d'un m. e. de Cu^{2+} ou de $CuAc^{+}$.

Secundo, en plus des purs échanges d'adsorption, un certain nombre d'auteurs (BROWN, 1950) (6) (ELGABALY, 1950) (11) ont suggéré la possibilité d'une absorption sous forme non échangeable pour le Cu, ainsi que pour des cations voisins ; Zn, Mg. Cette fixation à l'intérieur du réseau des argiles s'effectuerait par substitution isomorphe des cations Al^{3+} ou celle d'autres cations rétrogradés, en particulier Mg^{2+}. Il est alors possible que cette réorganisation à l'intérieur du réseau s'accompagne d'une libération de K non échangeable, mais à notre connaissance, aucune expérience décisive n'a été faite jusqu'à maintenant.

Dans la série d'essais que nous avons entrepris, nous nous sommes proposés de déterminer les variations d'adsorption des ions Cu en fonction d'une augmentation de la concentration en cuivre de la solution, et en fonction des variations de pH.

Nous avons opéré à 3 valeurs de pH : 3,0 — 5,0 — et 6,5, l'intervalle de concentration à l'équilibre étant compris entre 0,003 et 0,5 mg Cu/cm³. Au cours de la réaction d'échange, les variations de pH du milieu demeurent toujours inférieures à 0,1 unité pH.

Les résultats de ces déterminations sont résumés dans le tableau II et sur le graphique 4.

TABLEAU II

Variation d'adsorption des ions Cu sur l'argile P_2 en fonction du pH.

pH = 3,0		pH = 5,0		pH = 6,5	
Concentration en Cu à l'équilibre mg/cm³	mg Cu adsorbés pour 1 g de particules	Concentration en Cu à l'équilibre mg/cm³	mg Cu adsorbés pour 1 g de particules	Concentration en Cu à l'équilibre mg/cm³	mg Cu adsorbés pour 1 g de particules
0,0342	0,101	0,0243	0,240	0,0030	1,49
0,0702	0,358	0,0450	0,386	0,0104	2,81
0,144	0,679	0,0980	0,673	0,0394	3,69
0,214	0,801	0,146	0,852	0,0760	5,44
0,373	1,37	0,258	1,39	0,168	6,96
		0,498	2,20	0,421	9,20

On notera l'augmentation considérable de sorption des ions Cu pour des valeurs de pH voisines de la neutralité. Pour ces valeurs de pH il devient difficile de faire le partage entre cuivre adsorbé et cuivre précipité, car si l'on étudie la précipitation des sels de cuivre en fonction du pH (BOISCHOT, 1952) (4) on constate que la précipitation des ions cuivriques

commence à partir de 5,3. Ce pourcentage de précipitation est d'autant plus élevé à pH égal que la solution est plus concentrée.

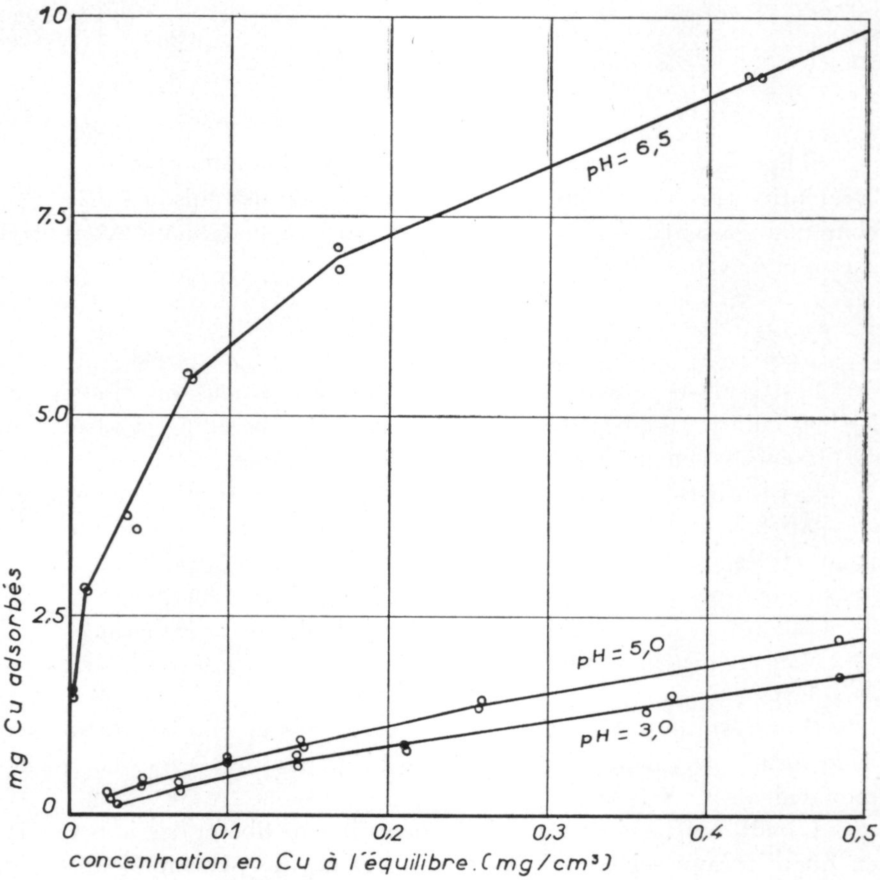
Ainsi 90 p. 100 de cuivre est précipité à pH :

5,8 pour une concentration de 0,4 mg/cm³.

7,2 pour une concentration de 0,2 mg/cm³.

7,5 pour une concentration de 0,04 mg/cm³.

8,1 pour une concentration de 0,001 mg/cm³.



Graphique N°4

La courbe correspondant à pH = 6,5 serait alors la résultante entre les réactions d'adsorption et les réactions de précipitation.

La capacité maximum de saturation en cuivre déterminée par saturation de l'argile P_2 avec une solution à 0,1 m. e. Cu/cm³, puis désorption du cuivre adsorbé par une solution d'acétate d'ammonium N/1 est de

1,78 m. e. pour 1 g de particules, le taux de sorption du cuivre par cette argile aux valeurs de pH envisagées serait alors :

Concentration en Cu^{2+} à l'équilibre mg/cm³	pH = 3,0		pH = 5,0		pH = 6,5	
	m. e. Cu^{2+} adsorbé	% de la cap. maxim. de satur. en Cu	m. e. Cu^{2+} adsorbé	% de la cap. maxim. de satur. en Cu	m. e. Cu^{2+} adsorbé	% de la cap. maxim. de satur. en Cu
0,05	0,008	0,4	0,013	0,7	0,138	7,8
0,1	0,016	0,9	0,019	1,0	0,184	10,3
0,2	0,027	1,5	0,035	1,9	0,228	12,8
0,4	0,047	2,5	0,060	3,3	0,274	15,4

Si l'on exprime ces résultats en partie par million d'argile, on notera la rétention très importante du cuivre par ces colloïdes puisqu'à pH = 3,0 pour une concentration à l'équilibre de 0,05 mg/cm³, nous avons déjà 250 ppm de Cu adsorbé.

CONCLUSIONS

Les résultats obtenus au cours de cette étude nous ont montré que les ions cuivriques présentaient les phénomènes classiques d'adsorption en présence d'échangeurs minéraux ou de synthèse.

Les isothermes d'adsorption mettent en évidence une concordance très satisfaisante entre les quantités de Cuivre adsorbées expérimentalement et les quantités déterminées à partir de la loi de FREUNDLICH. La concordance entre ces deux valeurs peut se justifier par le fait que les échanges se font pratiquement entre ions de même valence.

Nous avons essayé de préciser les états de valence possible du cuivre en solution.

Il en résulte que le cuivre peut exister dans la solution du sol sous deux formes de valence : ions cuivriques bivalents Cu^{2+} et ions complexes monovalents CuX^{+}.

L'hydrolyse des ions Cu^{2+} n'est susceptible de libérer des ions $CuOH^{+}$ en quantité appréciable que pour des valeurs de pH supérieures à 7.

Dans le cas d'ions complexes CuX^{+}, en essayant de préciser le taux de dissociation de Cu^{2+} en CuX^{+} nous avons constaté l'influence de la concentration en Cu sur les conditions d'équilibre entre cuivre bivalent et cuivre monovalent.

Pour les faibles concentrations en Cu inférieures à 0,05 g/l les ions Cu^{2+} sont l'espèce ionique la plus importante. Pour les concentrations supérieures, il y a équilibre entre la dissociation de $CuAc^{+}$ et Cu^{2+}. Pour les fortes concentrations, supérieures à 5,5 g/l, les ions $CuAc^{+}$ sont l'espèce ionique la plus importante.

A partir de ces résultats nous nous proposons d'étudier dans la deuxième partie de ce travail, la désorption des ions Cu adsorbés par divers réactifs d'extraction et d'envisager l'influence des conditions de saturation en Cu sur le passage à des formes plus ou moins facilement échangeables de cuivre.

RÉSUMÉ

Dans cette étude l'auteur montre que les ions cuivriques suivent les lois classiques de l'adsorption lorsqu'ils sont en présence d'échangeurs minéraux ou de synthèse.

Les isothermes d'adsorption mettent en évidence une concordance satisfaisante entre les quantités de cuivre adsorbées expérimentalement et les quantités déterminées à partir de la loi de FREUNDLICH.

L'auteur a cherché à préciser les états de valence du cuivre dans la solution du sol. Le cuivre peut exister sous deux formes de valence : ions cuivriques bivalents et ions complexes monovalents.

L'hydrolyse des ions cuivriques est examinée ainsi que l'influence de la concentration en cuivre sur les conditions d'équilibre, entre le cuivre bivalent et le cuivre monovalent.

SUMMARY

The exchange of copper ions in mineral colloids. I. Adsorption phenomena.

It is shown that copper ions follow the classical laws of adsorption in presence of mineral or synthetic exchangers.

The isotherms of adsorption show a satisfactory agreement between the amounts of copper determined experimentally and those calculated by Freundlich's law.

It was found that the copper in the soil solution may be present in divalent form and as monovalent complex ion.

The hydrolysis of copper ions, and the effect of copper concentration on the equilibrium between divalent and monovalent forms of copper were also studied.

ZUSAMMENFASSUNG

Kupfer-II-Ionenaustausch auf Mineralkolloïden.
I. Adsorptionserscheinungen.

Der Autor zeigt in dieser Arbeit, die Befolgung der klassischen Gesetze der Adsorption der Kupfer-II-Ionen in Gegenwart von mineralischen oder synthetischen Austauscher.

Es besteht eine zufriedenstellende Uebereinstimmung zwischen den Adsorptionsisothermen der experimentell adsorbierten Kupfermengen sowie der, nach dem Gesetz von Freundlich ermittelten Mengen.

Der Autor war bestrebt, die Wertigkeitsstufen des in der Bodenlösung vorliegenden Kupfers zu präzisieren. Das Kupfer kann unter zwei Wertigkeitsformen vorkommen : divalente Kupferionen und monovalente Komplexionen.

Die Hydrolyse der Kupfer-II-Ionen sowie der Einfluss der Kupferkonzentrationen auf die Gleichgewichtsbedingungen zwischen divalentem und monovalentem Kupfer, wurden untersucht.

Обмен ионов меди на минеральных коллоидах. I. Явления адсорбции.

Ж. МЮЛЛЕР. (Антибская Агрономическая Станция.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В этом труде автор показывает, что ионы двухвалентной меди следуют общим законам адсорбции, когда они находятся в присутствии минеральных или синтетических обменителей.

Адсорбционные изотермы позволяют видеть достаточное соответствие между количествами меди адсорбированными в опытах и количествами определенными согласно закону ФРЕЙНДЛИХА.

Автор желал определить состояния валентности меди в почвенном растворе. Медь может находиться в виде двухвалентных ионов и в виде сложных одновалентных ионов.

Исследован гидролиз двухвалентной меди, равно как и влияние концентрации меди на условия равновесия между двухвалентной и одновалентной медью.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Aldrich (D. G.) and Buchanan (J. R.). — Anomalies in technique for preparating H-Bentonite. *Soil Sci. Soc. of Amer. Proc.*, **22,** 281-285, 1958.

(2) Bear (F. E.). — Chemistry of the Soil. Reinhold-Pub-Cor. New York, 1955.

(3) Bittel (R.). — Étude de la solubilisation des éléments utiles aux végétaux, en vue de l'appréciation de la fertilité minérale des sols. — Thèse Fac. Sci. Paris, 1956.

(4) Boischot (P.) et Quillon (M.). — Fixation du Cuivre dans les sols calcaires. *Ann. Agro. III*, **3,** 359-364, 1952.

(5) Broadbent (F. E.) and Ott (J. B.). — Soil organic matter-metal complexe : 1. Factors affecting retention of various cations. *Soil Sc.*, **83,** 419-427, 1957.

(6) Brown (A. L.). — Zinc relationship in Aiken-clay loam. *Soil Sci.*, **69,** 349-358, 1950.

(7) Demumbrun and Jackson (M. L.). — Copper and Zinc exchange from dilute neutral solution by soil colloïdal electrolytes. *Soil Sci.*, **81,** 353-357, 1956.

(8) Doucet (Y.) et Cogniac (R.). — Sur la dissociation ionique de l'acétate de cuivre par la méthode des conductibilités. *C. R. Ac. Sci.*, **240,** 968-970, 1956.

(9) Drouineau (G.) et Mazoyer (R.). — Toxicité du Cuivre et évolution des sols sous l'influence des anti-parasitaires. *C. R. Ac. Agric. de France*, XXXIX, 390-392, 1953.

(10) Drouineau (G.) et Mazoyer (R.). — Toxicité du Cuivre dans les sols. VIe Congrès de la Science du Sol. IV, 419-421, 1956.

(11) Elgabaly (M. M.). — Mecanism of Zinc fixation by colloïdal clays and related minerals. *Soil Science*, **69,** 167-173, 1950.

(12) Ericksson (E.). — Polarographic investigations on pyrophosphate complexes. *Ann. Ec. Sup. Agr. Sued.*, **16,** 72-83, 1949.

(13) Henriksen (A.) and Jensen (H. L.). — Chemical and microbiological determinations of copper in soil. *Acta. Agr. Scand.*, VIII-4, 441-469, 1958.

(14) Jamison (V. C.). — Adsorption and fixation of copper in some sandy soils of Central Florida. *Soil Sci.*, **53,** 287-297, 1942.

(15) MAZOYER (R.). — Sur une nouvelle méthode colorimétrique de dosage du cuivre dans les plantes. *Ann. Agron.*, III, 299-300, 1958.
(16) MENZEL (R. G.), and JACKSON (M. L.). — Sorption of copper from acid system by kaolinite and montmorillonite. *IV° Inter. Congres of Soil Sci.* I, 125-128, 1950.
(17) MENZEL (R. G.) and JACKSON (M. L.). — Mecanism of sorption of hydroxy-cupric ion by clays. *Soil Sci. Soc. of Amer. Proc.*, **15**, 122-123, 1950.
(18) MOREL (R.). — Étude expérimentale des phénomènes d'échange sur différents minéraux argileux. *Ann. Agron.*, **1**, 5-90, 1957.
(19) NILSON (C.), WETLISEN (C. U.) and CRAN (G.). — The Menograph n° 12 by Hopkin and Williams. Ltd.
(20) PASCAL (P.). — Nouveau Traité de chimie minérale. Masson Ed. Paris, T. 3, 1957.
(21) SCHLICHTING (E.). — Kupferbinding und-fixierung durch Humsstoffe. *Acta. Agr. Scand.*, **5**, 313-356, 1955.

634. 25 : 631. 811 : 581. 14.

EFFETS DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS FERTILISANTS SUR LE DÉVELOPPEMENT VÉGÉTATIF ET SUR LA PRODUCTION DU PÊCHER

PAR

J. LIWERANT

Station d'Agronomie et d'Œnologie, Toulouse

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Introduction.

Complexité de l'expérimentation sur arbres fruitiers.

II. — Conditions de l'expérience.

Dispositif expérimental.
Sol.
Observations culturales.
Méthodes de contrôle.

III. — Résultats expérimentaux.

Effets des éléments fertilisants sur :
1° Le développement végétatif : charpente, bois de l'année ;
2° La mise à fruits : boutons floraux ;
3° La fructification : calibre des fruits, rendement.

IV. — Expériences étrangères.

V. — Résumé et conclusions.

I. — INTRODUCTION

Depuis la dernière guerre, et plus particulièrement au cours de ces dix dernières années, la culture du pêcher a pris un essor considérable. La production nationale de pêches est passée de 68 000 T à plus de 200 000 T, soit un accroissement de 200 p. 100. Dans certaines régions, notamment dans le Bassin de la Garonne, l'extension de cette culture est tout à fait remarquable. Ainsi, par exemple, dans chacun des départements du Lot-et-Garonne et du Tarn-et-Garonne, la production des pêches est passée de 3 à 4 000 T en 1938 à plus de 20 000 T en 1957. Dans la Haute-Garonne, la Gironde, la Dordogne, où la pêche occupe une place moins importante, la progression est du même ordre.

Cette rapide progression de la production résulte, d'une part, de l'extension continue des surfaces plantées et, d'autre part, de l'amélioration de la productivité, grâce aux perfectionnements des techniques culturales. Un choix plus judicieux des terrains quant à leur nature et à leur situation, un matériel végétal amélioré, un espacement plus large des arbres, leurs formes plus rationnelles, etc. et surtout leur protection antiparasitaire efficace, permettent d'obtenir des arbres vigoureux, susceptibles de fournir une production élevée. Dans les vergers récents, situés en sols assez profonds et bien constitués, des rendements très supérieurs à 20 T à l'hectare ne constituent pas des cas très rares.

Mais on constate souvent que la haute productivité des arbres ne se maintient pas longtemps. Après quelques récoltes abondantes, la végétation se ralentit, le calibre moyen des fruits tend à diminuer, la production baisse. Les arbres commencent à « bouder », suivant l'expression imagée de certains praticiens.

Lorsque les propriétés physiques du sol ne sont pas en cause, ce phénomène est généralement lié à l'alimentation défectueuse des arbres. De plus en plus nombreux sont les arboriculteurs qui n'attendent pas que les arbres « boudent » pour intervenir. Soucieux de s'assurer des récoltes abondantes et régulières, ils apportent préventivement, en plus d'une fumure organique périodique généralement à faible dose, une fumure minérale annuelle dont l'importance et l'équilibre sont extrêmement variables. Ces fumures, souvent basées sur l'expérience acquise sur cultures annuelles ou maraîchères, ne produisent pas toujours les effets recherchés. Leur efficacité faible ou irrégulière peut être attribuée soit à l'insuffisance, soit au déséquilibre, soit enfin au mode ou à l'époque de leur application. Il n'est pas toujours facile de déterminer la cause exacte de l'insuccès, car nos connaissances en matière d'alimentation des arbres fruitiers en général, et du pêcher en particulier, sont encore assez fragmentaires. De toutes les techniques applicables en culture fruitière, la fumure semble être celle dont les progrès sont les plus lents, les nouvelles acquisitions assez rares. Il est vrai que ce problème est relativement récent. Il s'impose cependant avec beaucoup d'acuité par suite de la multiplication rapide des exploitations fruitières spécialisées, et par suite aussi de l'accroissement des besoins alimentaires des arbres plus vigoureux qu'il est possible d'obtenir actuellement grâce aux techniques culturales plus perfectionnées.

Peu d'expériences méthodiques de fumure, dans les conditions de culture au verger, ont été réalisées jusqu'à présent. De telles expériences présentent de sérieuses difficultés : leur contrôle soulève des problèmes délicats ; elles sont longues et laborieuses et exigent des conditions et des moyens qui font souvent défaut.

Complexité de l'expérimentation sur arbres fruitiers.

Aux difficultés propres à toute expérimentation culturale, telles que la variabilité du milieu sol et des facteurs climatiques, viennent s'ajouter celles inhérentes aux particularités morphologiques et physiologiques de l'arbre, en tant que plante pérenne et ligneuse.

Chez l'arbre, les processus qui aboutissent à la formation des fruits se répartissent sur deux cycles annuels successifs. L'importance d'une récolte n'est pas déterminée par les seules conditions de nutrition de l'année en cours. Elle dépend pour beaucoup de celles qui accompagnaient, au cours de l'année précédente, la différenciation des boutons floraux, dont le développement est influencé par l'importance de la charge supportée alors par l'arbre. Cette dernière ayant été, elle-même, affectée par les conditions de nutrition de l'année précédente, il s'ensuit que sur chaque récolte se reflètent, étroitement imbriquées, les influences positives ou négatives auxquelles l'arbre a été soumis au cours des années successives.

Les conditions défavorables de nutrition pouvant exister à un certain moment du cycle annuel, ne se répercutent pas toujours avec intensité sur la récolte de l'année. Les réserves nutritives que les organes pérennes de l'arbre sont susceptibles d'accumuler, si elles sont maintenues à un niveau assez élevé, permettent de faire face à une absorption temporairement insuffisante. Mais lorsque ces réserves sont trop faibles pour satisfaire aux divers besoins qui se manifestent simultanément à la fin du printemps, par exemple, l'arbre assure par priorité la maturation de ses fruits ; le développement des boutons floraux pour la récolte suivante s'en trouve alors plus ou moins affecté.

Par contre, lorsque l'arbre, par suite de nutrition déficiente prolongée, ne produit que peu de bois de remplacement qui seul est fructifère, il ne faut pas s'attendre à ce que l'apport d'une fumure, même abondante, augmente la récolte qui suit d'une manière spectaculaire. Le redressement de la productivité d'un arbre exige un délai d'autant plus long que le rabougrissement de ses organes aériens et souterrains est plus prononcé.

En outre, les éléments fertilisants, lorsqu'ils sont apportés dans la couche superficielle du sol, ne sont pas immédiatement accessibles aux racines des arbres. La potasse et surtout l'acide phosphorique, ne migrent dans la zone où se trouvent la majorité des racines (entre 20 et 50 cm) que très lentement et ne deviennent pleinement efficaces qu'après un certain nombre d'années, variable avec la nature du sol.

On admet que pour être valables, les expériences sur la fumure phosphopotassique doivent être poursuivies pendant une série d'années, même lorsqu'il s'agit de cultures annuelles. L'effet de ces fumures varie avec les années par suite de l'accumulation dans le sol des arrière-effets des

apports successifs. Chez les arbres fruitiers, le problème se complique du fait qu'en même temps que le sol, le végétal lui-même enregistre et accumule dans ses organes pérennes les effets des traitements successifs. Ces effets, positifs ou négatifs, se manifestent sur la végétation et sur la fructification pendant un certain nombre d'années après la cessation des traitements qui les ont engendrées. Pour toutes ces raisons, les effets d'une fumure ou d'une déficience nutritive ne peuvent être déterminés valablement que si l'expérience est poursuivie pendant une période assez prolongée et que son contrôle est effectué par des méthodes appropriées aux arbres fruitiers.

Une expérience de fumure de longue durée sur pêchers (1) nous a permis d'effectuer un certain nombre d'observations sur le rôle des principaux éléments fertilisants dans le développement et la fructification de cette espèce fruitière.

II. — CONDITIONS DE L'EXPÉRIENCE

Dispositif expérimental.

L'expérience fut établie d'après la méthode dite de « fumures incomplètes » dans laquelle on compare les fumures carencées en un élément (NP, NK, PK) à la fumure dite complète (NPK). Deux parcelles témoins (T) n'ont reçu aucune fumure pendant toute la durée de l'expérience.

Les jeunes pêchers, variété *Amsden* sur franc, ont été divisés au moment de leur plantation, en parcelles de 30 arbres chacune. Les différentes formules de fumure appliquées comportaient à l'hectare :

Azote	100 kg du sulfate d'ammoniaque.
P_2O_5	125 kg du superphosphate.
K_2O	150 kg du sulfate de potasse.

Chaque année à la fin de l'hiver, les engrais étaient épandus uniformément sur la surface du sol et enfouis à 10 cm de profondeur par des façons superficielles. Aucune fumure n'a été appliquée avant la plantation, mais le terrain a été homogénéisé sur une profondeur de 50 cm environ par des labours profonds.

Le verger n'était pas régulièrement irrigué ; on n'apportait de l'eau, en quantité limitée, que lorsqu'une sécheresse prolongée risquait de compromettre la récolte ou la vie des arbres.

Sol.

Sol formé sur les alluvions anciennes de la Garonne (terrasse *a* I^b), peu profond (50 cm), graveleux, dépourvu de calcaire, mais de réaction neutre ; sous-sol constitué par une couche épaisse et compacte de graviers

(1) Le dispositif expérimental mis en place à la plantation a été maintenu pendant 15 ans.

liés entre eux par un limon très argileux. L'analyse effectuée au moment de la plantation a donné les résultats suivants :

Analyse granulométrique : pour 100 *de terre fine.*

Sable grossier	— (2 à 0,2 mm)	9,2
Sable fin	— (0,2 à 0,02 mm)	48,4
Limon	— (0,02 à 0,002 mm)	28,4
Argile	— (< 0,002 mm)	11,4

Analyse chimique : pour 1 000 *de terre fine.*

Azote total	1,25
P_2O_5 assimilable (Dyer)	0,14
K_2O échangeable	0,20
CaO échangeable	2,75
MgO échangeable	0,28

Au point de vue physique, c'est un sol un peu battant, à capacité pour l'eau plutôt limitée. Sa teneur initiale en éléments fertilisants était satisfaisante ; les sols de ce type sont généralement plus pauvres, en particulier en acide phosphorique assimilable. Dans le Bassin de la Garonne, de nombreuses plantations de pêchers sont établies sur des sols de cette nature ; lorsqu'ils sont suffisamment profonds ou irriguables, ils sont susceptibles de fournir des rendements assez élevés en produits de bonne qualité.

Observations culturales.

Au cours des premières années, on n'a pas relevé de différences significatives entre les arbres recevant des fumures différentes.

Par la suite, les arbres ont commencé à se différencier, aussi bien au point de vue de leur développement végétatif que de celui de la production ; les différences allaient en s'accentuant d'année en année. L'épuisement progressif des réserves initiales du sol et les apports renouvelés d'une même formule de fumure ont modifié profondément le niveau et l'équilibre nutritif du sol des diverses parcelles. Les arbres ont peu à peu accusé ces modifications et ont fini par les refléter avec netteté.

Méthodes de contrôle.

Les répercussions de l'application prolongée de différentes formules de fumure sur le développement et sur la composition chimique de divers organes de l'arbre ont été déterminées par les méthodes suivantes :

Déterminations analytiques.

Analyse périodique sur les organes jeunes qui reflètent plus rapidement et plus fidèlement les fluctuations du milieu nutritif : feuilles (diagnostic foliaire), brindilles (diagnostic ligneux), boutons floraux.

Déterminations biométriques.

Les effets sur le développement de l'arbre et sur sa productivité ont été déterminés par des mensurations, comptages et pesées des organes végétatifs et des fruits.

Les diverses déterminations effectuées sur les organes aériens et souterrains de l'arbre ont permis d'évaluer la quantité d'éléments fertilisants que cette culture prélève annuellement dans le sol (1).

On a, en outre, déterminé par l'analyse des échantillons de terre prélevés à la fin de l'expérience, les effets cumulés de l'application répétée de divers engrais sur le niveau et l'équilibre nutritif du sol, ainsi que la répartition dans le profil de P et de K. Ces données ont permis de dresser, avec l'approximation qu'un tel calcul comporte, le bilan des éléments fertilisants mis en œuvre dans l'expérience (2).

Les résultats des déterminations biométriques, effectuées alors que les arbres étaient âgés de 14 ans et avaient reçu 11 apports successifs d'engrais, seront seuls examinés dans cette note.

III. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

On examinera, successivement, les effets des éléments fertilisants sur :

1° Le développement végétatif du pêcher.

2° La mise à fruits.

3° La fructification.

I. — Effets sur le développement végétatif du pêcher.

Charpente. — La circonférence des troncs basses-tiges a été mesurée à mi-hauteur de ceux-ci ; celle des branches charpentières à 10 cm au-dessus de l'empattement. On a calculé ensuite les surfaces des sections qui reflètent plus fidèlement que les circonférences les différences dans le développement de la charpente.

Les bois de taille de chaque arbre, après en avoir éliminé les tronçons de deux ans ou plus, ont été réunis en fagots et pesés. Les résultats comparatifs, par rapport à la fumure NPK prise comme référence, figurent au tableau I.

I. — *Organes ligneux : indices de comparaison.*

	NPK	NK	NP	PK	T
Charpente					
Surface des sections					
Troncs	100	87,4	82,2	73,8	69,9
Charpentières	100	87,4	57,1	60,7	52,2
Bois de l'année					
Poids en matière sèche ..	100	80,1	48,0	51,7	40,2

Dans les expériences de fumure de longue durée sur plantes pérennes, les effets de divers traitements sont d'autant plus marqués que l'organe est plus jeune. Dans le cas du pêcher dont les rameaux les plus jeunes, ceux de l'année, sont seuls fructifères, cela revêt une importance particulière. Le nombre et la vigueur des jeunes pousses constituent, en effet, un des facteurs essentiels du potentiel de production de l'arbre.

Bois de l'année. — Les pousses anticipées ont été séparées des pousses d'un an et sur chacune de ces formations on a effectué un certain nombre de déterminations dont les résultats comparatifs figurent au tableau II.

II. — *Rameaux d'un an et anticipés : indice de comparaison.*

	NPK	NK	NP	PK	T
Nombre par arbre					
Pousses d'un an.........	100	86,6	81,9	73,6	64,6
Pousses anticipées.......	100	82,7	33,6	26,8	18,6
Poids total					
Pousses d'un an.........	100	81,3	51,6	56,9	45,1
Pousses anticipées.......	100	77,5	28,6	24,2	14,1
Longueur totale					
Pousses d'un an.........	100	85,9	71,3	64,7	54,9
Pousses anticipées.......	100	82,0	31,0	25,7	14,9
Poids moyen					
Pousses d'un an.........	100	93,9	62,2	77,2	73,1
Pousses anticipées.......	100	93,2	85,4	90,3	75,7
Longueur moyenne					
Pousses d'un an.........	100	99,2	87,1	87,9	85,0
Pousses anticipées.......	100	98,3	89,3	92,7	82,4
Poids d'un mètre					
Pousses d'un an.........	100	95,0	70,9	87,4	86,4
Pousses anticipées.......	100	93,7	87,6	96,2	95,5

Le nombre d'anticipés par arbre varie beaucoup plus que celui des pousses d'un an. Ainsi, par rapport à la fumure NPK, la fumure sans azote (fumure PK) ou sans potasse (fumure NP) entraîne une diminution du nombre d'anticipés de l'ordre de 70 p. 100, alors que celui des pousses d'un an ne diminue que de 25 p. 100 environ. Cela confirme l'observation que les divers traitements se répercutent avec plus d'intensité sur les organes les plus jeunes.

Il convient de remarquer le faible poids moyen d'un mètre de pousses NP. Par rapport à la fumure NPK, ce poids n'est qu'à l'indice 70,9 alors qu'il est au moins égal à 87,4 pour les pousses des arbres recevant de la potasse.

La proportion respective des pousses faibles et vigoureuses varie dans des limites assez larges avec la fumure appliquée. Pour déterminer l'ampleur de ces variations, les pousses de chaque arbre ont été classées d'après leur longueur, en trois lots :

— Rameaux courts : au-dessous de 35 cm.

— Rameaux moyens : de 35 à 65 cm.

— Rameaux longs : au-dessus de 65 cm.

D'autre part, les pousses anticipées ne se forment en grand nombre que sur les rameaux vigoureux. Le nombre d'anticipés par 100 rameaux peut, par conséquent, servir d'indice de l'activité végétative de l'arbre. Les résultats des déterminations effectuées sur les jeunes rameaux figurent au tableau III.

III. — *Effets de la fumure sur le développement des jeunes rameaux.*

	NPK	NK	NP	PK	T
Pour 100 rameaux d'un an :					
Rameaux courts.........	33	35	41	41	42
Rameaux moyens	45	44	50	47	50
Rameaux longs	22	21	9	12	8
	100	100	100	100	100
Anticipés	87	87	36	32	25
Poids sec d'un rameau (gr) :					
Anticipés	1,03	0,96	0,88	0,93	0,78
Rameaux courts	1,11	1,08	1,33	1,30	1,24
Rameaux moyens	3,54	3,58	3,37	3,91	4,00
Rameaux longs	12,90	12,20	10,80	11,00	9,60

Les effets sur le développement végétatif du pêcher de la suppression prolongée dans la fumure de l'un des éléments fertilisants peuvent se résumer ainsi :

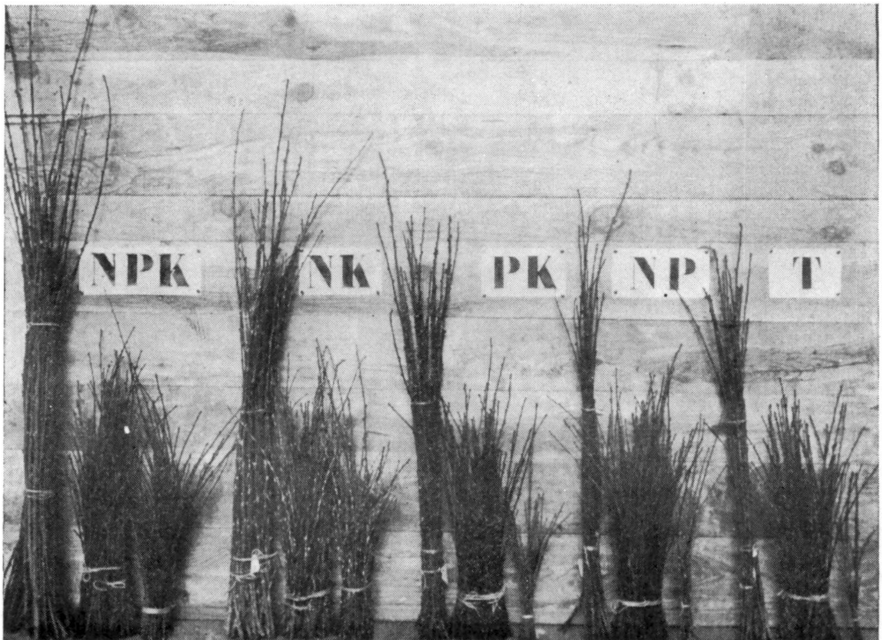


FIG. 1. — Effet de la fumure sur le développement du bois de l'année. Chaque groupe de trois fagots représente le bois de taille d'un pêcher moyen : 1. — Pousses > 65 cm ; 2. — Pousses < 65 cm ; 3. — Anticipés.

Effets de la suppression de l'azote (fumure PK). — La fumure sans azote a donné des arbres à charpente faible et d'une envergure réduite. Par rapport à la fumure NPK, la section des troncs est inférieure de 26,2 p. 100, celle des charpentières de 39,3 p. 100. La déficience en azote s'est répercutée de la manière la plus intense sur les jeunes bois fructifères dont le poids total par arbre a baissé de moitié environ. La diminution a porté sur le nombre et sur la vigueur des pousses d'un an. Le pourcentage des pousses longues terminales (au-dessus de 65 cm) susceptibles de donner des prolongements vigoureux est sensiblement plus faible (12 au lieu de 22 pour les arbres NPK).

Effets de la suppression de la potasse (fumure NP). — La fumure sans potasse a eu sur le développement végétatif du pêcher des effets comparables à ceux de la fumure sans azote. La réduction de l'envergure de l'arbre, la diminution du poids total des jeunes pousses étaient du même ordre de grandeur. Ces pousses se distinguaient cependant de celles de toutes les autres parcelles par la faible densité de leurs tissus.

Dans une étude sur la vigne, E. VINET (3) avait relevé que la faible densité des tissus des sarments était due à la déficience en potasse qui entraînait une maturité insuffisante des bois et une fructification défectueuse. D'après les observations faites sur des boutons floraux, il semble qu'il en soit de même pour le pêcher.

Effets de la suppression de l'acide phosphorique (fumure NK). — La fumure sans acide phosphorique a également freiné le développement végétatif du pêcher, mais d'une manière moins accusée. Par rapport aux arbres NPK, la charpente était réduite de 12,6 p. 100. Le poids total des jeunes bois a baissé de 20 p. 100, alors que la suppression de l'azote ou de la potasse l'avait réduit de 50 p. 100 environ. Le poids d'un mètre était légèrement plus faible que celui des pousses NPK.

2. — Effets sur la mise à fruits

Boutons floraux. — L'influence de diverses fumures sur la mise à fruits a été examinée sur les rameaux de longueur moyenne (35 à 65 cm). Sur ces rameaux, on a prélevé tous les boutons floraux, et on a déterminé leur nombre et leur poids moyen en matière sèche. Les résultats figurent au tableau IV.

IV. — *Effet de la fumure sur le développement des boutons floraux.*

Fumure	NPK	NK	NP	PK	T
Nombre de boutons floraux par :					
rameau moyen	18,1	16,1	11,3	24,7	15,3
100 g. de rameaux	509,0	442,0	333,0	631,0	380,0
Poids de 1000 boutons floraux en g..................	5,45	5,29	4,46	5,98	5,36

Ces chiffres montrent que :

1° La fumure sans azote (PK) a favorisé la différenciation et le développement des boutons floraux. Plus nombreux que sur les pousses des arbres NPK (+ 36 p. 100) et un peu plus gros (+ 10 p. 100), ils étaient souvent groupés par deux, parfois par trois.

2° La fumure sans potasse (NP) a eu, au contraire, un effet défavorable. Moins nombreux que sur les pousses NPK (— 37 p. 100), moins bien développés (— 18 p. 100), ils étaient le plus souvent isolés, parfois groupés par deux.

3° La fumure sans acide phosphorique (NK) a diminué le nombre moyen de boutons floraux par pousse de 11 p. 100.

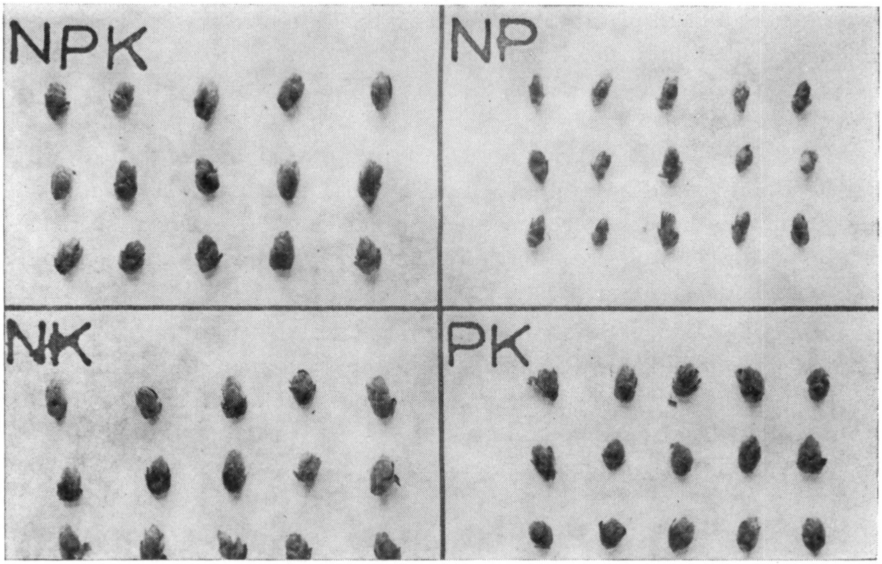


FIG. 2. — Effet de la fumure sur le développement des boutons floraux.

Si la fumure PK a contribué à rendre les pousses plus fertiles, le nombre total de boutons floraux par arbre, ainsi que celui de fruits récoltés, étaient loin d'être les plus élevés. L'insuffisance d'azote, absent dans la fumure, a donné des arbres de faible envergure et, de ce fait, on a été amené à réduire la charge par un éclaircissage sévère.

Il ressort néanmoins de ces observations que, dans la mise à fruits du pêcher, un rôle important revient à la potasse, puis à l'acide phosphorique.

On a trop souvent tendance à négliger ce dernier élément, parce qu'il est absorbé par l'arbre en quantités moindres que l'azote et la potasse.

On sait (4) que les tissus les plus jeunes sont les plus riches en éléments nutritifs minéraux. Les jeunes feuilles et brindilles contiennent

au départ 3 à 4 p. 100 d'azote et 0,5 à 0,6 p. 100 de P_2O_5. La teneur centésimale en ces éléments baisse régulièrement par la suite. L'azote diminuant, proportionnellement, davantage que l'acide phosphorique, il en résulte que le rapport N/P_2O_5, dans les feuilles par exemple, évolue au cours de la saison de 7 à 5, en moyenne.

Des recherches sur les boutons floraux (5, 6) ont mis en évidence que l'évolution chimique de ces organes s'effectue dans le sens inverse à celui des feuilles. La teneur en P_2O_5 augmente plus rapidement que celle en azote, et elle passe de 0,5-0,6 p. 100 au début de l'hiver à 1,2-1,4 p. 100 de matière sèche au moment de l'épanouissement des fleurs. Le rapport N/P_2O_5 s'établit alors entre 3 et 4. Cette augmentation de la teneur absolue et relative des boutons floraux en P_2O_5, laisse supposer que cet élément joue un rôle propre, spécifique dans la mise à fruits des arbres.

3. — Effets sur la fructification.

Calibre des fruits. — Dans les conditions normales, le nombre de fruits noués dépasse généralement de beaucoup celui que l'arbre est susceptible de nourrir et de mûrir convenablement. Si l'on n'intervient pas, le calibre des fruits mûrs est davantage fonction de la charge restée sur l'arbre après la chute naturelle que de la fumure appliquée. Mais lorsque la charge est régularisée par éclaircissage et mise en rapport avec la vigueur de l'arbre, l'influence de la fumure, toutes autres conditions étant égales, sur le calibre des fruits se manifeste nettement.

Dans le verger d'expériences, la récolte s'effectuait sur l'ensemble de la plantation en plusieurs cueillettes successives, s'étalant sur une période de 10 à 15 jours. A la première cueillette, les fruits mûrs étaient les plus nombreux sur la parcelle PK ; à la dernière, les fruits de la parcelle NP, généralement en retard de quelques jours, étaient le plus largement représentés. Le poids moyen a été déterminé sur un certain nombre de fruits prélevés sur chaque parcelle.

V. — *Effets de la fumure sur le poids moyen des fruits.*

Fumure	NPK	NK	NP	PK	T
Poids moyen en g	76,1	66,6	59,9	70,2	71,2

Les fruits étaient d'un calibre relativement faible sur toutes les parcelles. Dans ce verger, sur sol peu profond, ce phénomène se manifestait lorsque les précipitations atmosphériques étaient peu fréquentes à l'époque de la maturation des fruits. Or, dans la région toulousaine, la pluviosité est très variable au printemps. Ainsi, par exemple, au cours des trois années successives : 1948-49-50, on a enregistré, pour la période

avril-mai-juin, les hauteurs suivantes de pluie : 316, 220 et 119 mm. L'insuffisance d'eau a certainement ralenti le grossissement des fruits, sans toutefois annihiler les effets des fumures.

Le calibre des fruits s'est classé dans l'ordre décroissant suivant : NPK, PK, NK, NP. Les arbres témoins portaient moins de fruits, mais leur calibre était sensiblement celui des fruits de la parcelle sans azote (PK).

Rendement. — Il n'a pas été possible d'effectuer un contrôle direct des rendements par pesée des fruits récoltés au fur et à mesure de leur maturation. On a été amené à procéder par estimation : on déterminait peu avant la récolte, sur un certain nombre d'arbres de chaque parcelle, le nombre moyen de fruits par arbre qu'on multipliait par le poids moyen des fruits mûrs.

Le rendement de la parcelle NPK, ainsi évalué, s'élevait à 15,8 tonnes à l'hectare ; celui des autres parcelles était inférieur dans des proportions variables avec la fumure.

VI. — *Effets de la fumure sur le rendement en fruits.*

Fumure	NPK	NK	NP	PK	T
Rendement en T/ha	15,8	12,6	9,6	10,1	7,8
Indices de comparaison	100,0	79,7	60,8	63,9	49,4

Par rapport à la fumure dite complète, le rendement des parcelles à fumure binaire était inférieur de 20,3 à 39,2 p. 100 ; celui des parcelles témoins était deux fois plus faible. L'effet des différents traitements sur le rendement en fruits s'est classé dans l'ordre décroissant suivant : NPK, NK, PK, NP, T.

La comparaison entre les excédents de récolte fournis par la fumure NPK d'une part, et les fumures binaires d'autre part, fait ressortir plus clairement l'effet dépressif de l'omission systématique d'un élément fertilisant dans la fumure.

VII. — *Effets de la suppression prolongée dans la fumure d'un élément fertilisant sur le rendement en fruits.*

Éléments apportés	Excédents de récolte		Éléments suprimés	Déficits de récolte	
	T/ha	p. 100 du témoin		T/ha	p. 100 du témoin
N + P + K	+ 8,0	+ 102,4	—	—	—
N + K	+ 4,8	+ 61,3	P	— 3,2	— 41,1
P + K	+ 2,3	+ 29,3	N	— 5,7	— 73,3
N + P	+ 1,8	+ 23,1	K	— 6,2	— 79,3

On constate que, par rapport aux excédents de récolte fournis par la fumure NPK, ceux dus aux fumures binaires sont réduits dans des proportions considérables. La suppression de l'acide phosphorique a diminué l'excédent de deux cinquièmes, celle de l'azote ou de la potasse de trois quarts environ.

IV. — EXPÉRIENCES ÉTRANGÈRES

Si l'étude expérimentale de la fumure du pêcher est à peine ébauchée chez nous, de nombreuses expériences ont été réalisées à l'étranger, notamment aux Etats-Unis. Certaines expériences n'ont pas fourni de réponse précise à la fumure phospho-potassique ; d'autres, par contre, ont mis en évidence que cette fumure influence profondément le développement végétatif de l'arbre et son rendement en fruits.

Divers auteurs (7, 8) ont signalé des déficiences potassiques graves et des anomalies dans le développement des pêchers ne recevant que de l'azote ; ces anomalies ont pu être corrigées par des apports de fumures dites complètes. DAVIDSON et BLAKE (9), en se basant sur leurs expériences de nutrition sur sable et sur des observations au verger, recommandent l'emploi systématique des fumures complètes dans les vergers de pêchers sur sols légers.

Il nous paraît particulièrement intéressant d'examiner les résultats d'une expérience de fumure de longue durée de L. E. SCOTT (10).

Des pêchers *Elberta* ont été plantés, en 1929, en sol sablonneux de Caroline du Sud. Aucune fumure n'a été appliquée avant la plantation, mais toutes les parcelles ont reçu un amendement sous forme de calcaire dolomitique.

Les traitements suivants ont été expérimentés : N, NP, NK, NPK, et T (sans fumure). Les engrais étaient incorporés chaque année à l'automne, aux doses suivantes par arbre :

N : 330 g P_2O_5 : 180 g K_2O : 180 g

Les effets de ces différents traitements sur les rendements en fruits, pour la période 1933/38, sont résumés dans le tableau VIII ([1]).

TABLEAU VIII. — *Rendements : Fruits en kg par arbre.*

Fumures	1933	1934	1935	1936	1938	Rendement moyen annuel	Excédent moyen annuel
Témoin	10,4	17,6	29,2	19,9	21,1	19,6	—
N	22,0	25,7	41,6	14,7	16,6	24,1	+ 4,5
NP	30,3	31,0	50,5	31,3	14,4	31,5	+ 11,9
NK	31,8	37,9	73,9	33,9	55,9	46,7	+ 27,1
NPK	39,7	40,8	87,7	49,6	66,3	56,8	+ 37,2
Excédents significatifs à 19 : 1	10,6	10,7	13,8	13,2	18,8		

([1]) Année 1937 exclue, la récolte ayant été endommagée par les gelées.

La fumure NPK a fourni, pour une période de 5 ans, un rendement moyen annuel de 56,8 kg, avec un excédent de 37,8 kg par arbre. La suppression de l'acide phosphorique (fumure NK) a réduit cet excédent de 10,1 kg par arbre, soit de 27 p. 100 ; celle de la potasse (fumure NP) l'a diminué de 25,3 kg, soit de 68 p. 100. Enfin, la fumure sans P et sans K, c. a. d. l'azote seul, n'a fourni qu'un excédent non significatif de récolte de 4,5 kg par arbre.

Le calcul, d'après les données ci-dessus, des excédents de récolte obtenus au cours des années successives met en évidence que la rapidité et l'intensité avec lesquelles une déficience nutritive se manifeste, varient avec les éléments.

TABLEAU IX

Différences de récolte en kg par arbre.

Fumures	1933	1934	1935	1936	1938
N	+ 11,6	+ 8,1*	+ 12,4*	— 5,2*	— 4,5*
NP	+ 19,9	+ 13,4	+ 21,3	+ 11,4*	— 6,7*
NK	+ 21,4	+ 20,3	+ 44,7	+ 14,0	+ 34,8
NPK	+ 29,3	+ 23,2	+ 58,5	+ 29,7	+ 45,2

(*) non significatif.

L'examen de ces chiffres montre que les excédents de récolte dus à NPK sont constamment les plus élevés et ont tendance à augmenter avec le temps. La suppression de P (fumure NK) diminue régulièrement les excédents de récolte d'un quart environ. La suppression de K se manifeste d'une manière plus intense et plus rapide : la fumure NP cesse d'être efficace à partir de la quatrième récolte. Les effets de la suppression de P et de K s'ajoutent : l'azote seul cesse d'être efficace à partir de la deuxième récolte.

On constate d'autre part que l'efficacité de chacun des deux éléments P et K augmente lorsqu'ils sont réunis dans la même fumure :

Excédent de rendement dû à l'apport de K :

en l'absence de P : NK — N = 22,6 kg par arbre ;
en présence de P : NPK — NP = 25,3 kg par arbre.

Excédent de récolte dû à l'apport de P :

en l'absence de K : NP — N = 7,4 kg par arbre ;
en présence de K : NPK — NK = 10,1 kg par arbre.

V. — RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Notre expérience n'avait pas pour but de déterminer les doses optima d'engrais, ni l'équilibre de la fumure qui correspond le mieux aux besoins du pêcher. Elle ne visait qu'à mettre en évidence l'effet qualitatif de chaque élément fertilisant sur l'arbre et à faire ressortir le degré d'utilité de l'inclure dans la fumure.

La confrontation des résultats de notre expérience avec ceux de L. E. SCOTT montre que, dans ces deux cas, la suppression prolongée, dans la fumure, de l'un des éléments fertilisants a produit sur le rendement du pêcher des effets semblables.

TABLEAU X

Effets de diverses fumures sur le rendement du pêcher.

Variétés	Sols	Indices de comparaison					
		NPK	NK	NP	PK	N	T
Elberta [1]	Sablonneux (Caroline du Sud)	100,0	82,2	55,5	—	42,4	34,5
Amsden	Boulbène (S-O de la France)	100,0	79,7	60,8	63,9	—	49,4

[1] Moyenne de 5 récoltes.

Il existe généralement une relation directe entre le développement végétatif du pêcher et sa productivité. L'envergure de la charpente, l'importance de la surface foliaire, déterminent le nombre de fruits que l'arbre est susceptible d'amener à maturité, sans que leur calibre ne diminue et que la formation des boutons floraux pour la récolte suivante ne soit entravée. Le rapport végétation-fructification optimum varie d'ailleurs avec les caractères climatiques de la région : il n'est pas le même dans la vallée de la Garonne qu'en Provence, par exemple.

C'est la fumure dite complète NPK qui a permis d'obtenir les arbres les plus vigoureux et le rendement en fruits le plus élevé.

Les effets de la déficience en azote (fumure PK), faibles au début, augmentent progressivement. La croissance se ralentit de plus en plus, et les arbres adultes sont de faible envergure. Leur mise à fruits n'est pas entravée ; au contraire, ils fructifient abondamment. Mais pour obtenir des fruits de calibre commercial et ne pas compromettre la récolte à venir, on doit limiter la charge à la faible végétation de ces arbres. Leur production totale se trouve, de ce fait, fortement réduite (— 36 p. 100).

La déficience en K (fumure NP) se manifeste de bonne heure, et

lorsque l'arbre commence à produire, elle s'aggrave rapidement. Les troubles nutritifs qu'elle provoque sont préjudiciables tant à la végétation qu'à la fructification. La production totale baisse dans des proportions au moins aussi importantes (— 40 p. 100) que lorsque l'azote est déficient et les fruits sont de moins bonne qualité.

La déficience en P (fumure NK) est la plus lente à se manifester. Son effet dépressif est moins accusé que celui des autres éléments, mais non négligeable : la croissance est nettement moins active et la baisse de production peut atteindre 20 p. 100.

La déficience simultanée de P et de K exerce sur le pêcher les effets dépressifs les plus prononcés. Le manque de vigueur et la faible productivité de l'arbre semblent être en relation avec une sorte de rabougrissement du système radiculaire dont la croissance et la ramification sont freinées. Dans ces conditions, les apports d'azote seul, en accentuant le déséquilibre du milieu nutritif, sont inefficaces et peuvent à la longue devenir déprimants.

Le niveau et l'équilibre nutritif du terrain sur lequel on se propose de planter sont ceux qui résultent de son histoire culturale. Les sols qui, antérieurement, étaient bien cultivés et qui recevaient des fumures abondantes, peuvent contenir des réserves d'acide phosphorique, parfois aussi de potasse, suffisantes pour plusieurs années. De tels sols sont cependant peu nombreux, et leur équilibre nutritif ne correspond pas toujours aux exigences du pêcher. C'est au moment de la plantation, en se basant sur les résultats analytiques du sol, qu'il convient d'effectuer le redressement nécessaire par l'incorporation, sous forme de fumure de fond, d'une quantité suffisante de P et de K. Lorsque ce redressement a été réalisé, c'est l'application systématique d'une fumure comprenant les trois principaux éléments fertilisants qui offre le maximum de chances pour l'obtention des excédents de récolte régulièrement les plus élevés en quantité et qualité et, de ce fait, les plus rentables.

RÉSUMÉ

Expérience de fumure de longue durée sur pêchers *Amsden* sur franc, plantés en sol silico-argileux, peu profond, neutre. Traitements expérimentés : NPK, NK, PK, NP, T. Les engrais étaient épandus chaque année, à la fin de l'hiver, sur toute la surface et enfouis à 10 cm de profondeur.

Les effets des fumures étaient peu significatifs au cours des premières années, mais par la suite les arbres recevant des traitements différents ont commencé à se différencier, et les différences allaient en s'accentuant. Les déterminations effectuées sur les arbres âgés de 14 ans ont conduit aux constatations suivantes :

La fumure NPK a produit les arbres les plus vigoureux, fournissant les

récoltes les plus élevées en quantité et en qualité ; excédent de récolte par rapport au témoin sans engrais : + 102,4 p. 100.

En comparaison avec NPK, la suppression d'un élément a exercé un effet dépressif, variable avec l'élément supprimé.

Fumure sans azote (*PK*) : arbres de faible envergure ; jeunes rameaux moins nombreux et fructifiant abondamment ; fruits légèrement plus petits, mais vu le nombre limité de pousses, production totale inférieure de 36 p. 100.

Fumure sans potasse (*NP*) : charpente faible ; pousses peu vigoureuses, portant des boutons floraux moins nombreux et moins développés ; fruits nettement plus petits, mûrissant plus tard ; production inférieure de 40 p. 100.

Fumure sans acide phosphorique (*NK*) : effet dépressif moins marqué que celui de N et P, mais net ; végétation moins active, fructification moins abondante, fruits plus petits ; production totale inférieure de 20 p. 100.

En conclusion, lorsque l'analyse du terrain destiné à une plantation révèle une déficience en P ou K, il convient d'apporter une quantité suffisante de ces éléments avant plantation, en fumure de fond. Ce redressement réalisé, la fumure NPK appliquée systématiquement assure le mieux l'obtention régulière d'une production optimum.

SUMMARY

The effect of the main nutrient elements on the vegetative development and fructification of the peach tree.

The long-term experiments with peach trees planted in a shallow and neutral sandy clay involved treatments with NPK, NK, PK and NP applied annually at the end of the winter and incorporated to 10 cm depth in the soil.

The effects of fertilizing were not significant during the first few years, but treated trees began to show increasingly greater differences later. Determinations made on 14-year-old trese showed the following results.

Fertilizing with NPK produced the most vigorous trees, giving the quantitatively and qualitatively best yields which exceeded by 102. 4 p. 100 the yields of untreated controls.

Treatment without nitrogen (PK) produced short trees possessing fewer young branches ; there were good fructification and slightly smaller fruits, and the limited number of shoots resulted in a total yield 36 p. 100 lower than of trees receiving NPK.

Fertilizing by omitting potash (NP) yielded weak trees carrying shoots of little vigour which had fewer and less developed flower buds ; the considerably smaller fruits matured late and yields were 40 p. 100 below those treated with NPK.

Treatment without phosphate (NK) had less marked depressive effects, but the vegetation was less active, fructification and fruit size were smaller, and total production was 20 p. 100 less than with NPK fertilizing.

Results suggest that in soils of low P and K contents, planting should be preceded by an adequate supply of these nutrients in the base fertilizer. Subsequent regular application of NPK will assure optimum yields with a great regularity.

ZUSAMMENFASSUNG

Einwirkung der wesentlichsten Nährstoffe auf die vegetative Entwicklung und die Fruchtbildung beim Pfirsisch.

Es handelt sich um einen mehrjährigen Düngungsversuch von, auf Wildling gepfropften Amsden-Pfirsische, auf einem schwach tiefgründigem, neutralem Tonsilikatboden angelegt. Die Düngergaben wurden jährlich, gegen Winterende, ausgestreut und in 10 cm Tiefe eingegraben.

Im Laufe der ersten Jahre war kaum eine Düngerwirkung zu verzeichnen, doch in den folgenden Jahren, unterschieden sich die Bäume welche verschiedenartig gedüngt wurden ; diese Unterschiede traten immer mehr in den Vordergrund. Die auf dreizehnjährigen Bäumen ausgeführten Bestimmungen gaben zu folgenden Feststellungen Anlass :

Die kräftigsten Bäume, waren diejenige welche eine NPK-Düngung erhielten, ihre Erträge waren quantitativ und qualitativ die höchsten ; der Mehrertrag gegenüber « ungedüngt » war von + 102,4 %.

Im Vergleich zu NPK, gab das Auslassen eines Elementes Anlass zu einer depressiven Wirkung, die je nach dem fehlenden Element, verschieden war.

Ausbleib der Stickstoffdüngung (PK) : schwacher Wuchs der Bäume ; weniger junge Triebe sowie Abnahme der Fruchtbildung ; ein wenig kleinere Früchte, jedoch in Anbetracht der beschränkten Triebzahl, Gesamtertrag 36 % niedriger.

Ausbleib der Kalidüngung (NP) : schwaches Gerippe ; wenig starke Triebe mit geringer Anzahl von Blütenknospen sowie geringere Entwicklung derselben : Früchte rundweg kleiner, später reifend ; Ertrag um 40 % niedriger.

Ausbleib der Phosphorsäuredüngung (NK) : kleinere depressive Wirkung als bei N-oder P-Ausbleib, doch durchaus erkennbar ; weniger aktive Entwicklung, herabgesetzte Fruchtbarkeit, kleinere Früchte ; Gesamtertrag um 20 % niedriger.

Wenn die Analyse eines Bodengeländes, welches zur Errichtung einer Anlage bestimmt ist, einen P-oder K-Mangel aufweist, so kann vor der Anpflanzung, auf die Notwendigkeit einer Zufuhr ausreichender Mengen dieser Elemente in Form einer Grunddüngung geschlussfolgert werden. Nach Ausführung der vorhergehenden Verbesserung, erlaubt eine systematisch angewandte NPK-Düngung, das regelmässige Erlangen eines optimalen Ertrages.

Действие главных питательных элементов на рост и на плодоношение персикового дерева.

Ж. ЛИВЕРАН. (Тулузская Агрономическая Станция.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Продолжительные опыты удобрения персиков Амсден, привитых на персике, посаженных на суглинке, неглубоком и нейтральном. Испробованные формулы : NPK, NK, PK, NP и без удобрения. Удобрения применялись каждый год, в конце зимы, на всю поверхность и закапывались на глубину 10 см.

Действие удобрений было мало заметным в течение первых лет, но затем деревья получающие различные формулы начали отличаться и разницы продолжали увеличиваться. Определения произведенные на деревьях тринадцатилетнего возраста привели к следующим заключениям :

Удобрение NPK произвело деревья самые сильные, дающие урожаи наиболее значительные и наивысшего качества; избыток урожая по отношению к неудобренному участку : + 102,4 %.

По сравнению с NPK, устранение какого-либо элемента вызвало уменьшение урожая, различное для каждого устраненного элемента.

Удобрение без азота (PK) : деревья малорослые; молодые ветки менее многочисленные и обильно плодоносящие; фрукты немного более мелкие, но так как побегов мало, то общее производство понизилось на 36 %.

Удобрение без калия (NP) : ствол и главные ветки слабые; побеги слабосильные, имеющие меньше цветочных почек и более слабо развитых; фрукты явно более мелкие, позже поспевающие; урожай понижен на 40 %.

Удобрение без фосфора (NK) : угнетающее действие менее заметно, чем при отсутствии N и K, но все же явное; рост менее бодрый, плодоношение менее обильное, фрукты более мелкие; урожай понижен на 20 %.

В заключение, когда анализ почвы предназначаемой для насаждения указывает недостаток в P или K, следует внести достаточное количество этих элементов перед посадкой, как фундаментальное удобрение (fumure de fond). Когда это исправление осуществлено, удобрение NPK, систематически применяемое, обеспечивает наилучшим образом регулярное получение оптимальной продукции.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) LIWERANT (J.). — « La fumure des arbres fruitiers. B. T. I. 81, p. 575-581, 1953.

(2) LIWERANT (J.). — Effets de l'application prolongée des engrais minéraux sur un sol d'alluvions sous verger. Congrès International des engrais chimiques, Rome, 1951.

(3) VINET (E.). — Sur la fumure de la vigne et le rajeunissement de l'appareil radiculaire. *C. R. Ac. Agr.*, p. 854, 1938.

(4) LIWERANT (J.). — Teneurs en N, P_2O_5 et K_2O des différentes parties du pêcher. *Ann. Agr.*, p. 226-232, 1947.

(5) LIWERANT (J.). — Évolution chimique des boutons à fleurs du pêcher au cours de l'hiver. *C. R. Ac. Sc.*, **226**, p. 109-111, 1948.

(6) LIWERANT (J.). — Variations dans l'évolution chimique des boutons à fleurs. *Ann. Agr.*, p. 590-593, 1948.

(7) DUNBAR (C. O.) et ANTONY (P. D.). — Deux cas de carence potassique dans les vergers de pêchers de Pennsylvanie sud-centrale. *Proc. Am. Soc. Hort. Sc.*, **35**, 320-385, 1938.

(8) RAWL (E. H.) et STALLWORTH (W. H.). — En Caroline du Sud, des anomalies se développent sur les pêchers fertilisés uniquement avec de l'azote. *S. C. Ext. Hort. Circ.*, **10**, 1935.

(9) DAVIDSON (O. W.) et BLAKE (M. A.). — Déficience nutritive et équilibre nutritif du pêcher. *Proc. Am. Soc. Hort. Sc.*, **35**, 339-346.

(10) SCOTT (L. E.). — Effets des engrais phosphatés et potassiques sur le pêcher dans la zone des collines sabloneuses du Sud-Est. *Proc. Am. Soc. Hort. Sc.*, **38**, 56-60, 1938.

631. 416. 872 : 634. 989. 84.

PRÉCISIONS SUR L'UTILISATION DE DIVERS COLORANTS POUR LE DOSAGE COMPLÉXOMÉTRIQUE DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM DANS LES AMENDEMENTS, DANS LES SOLS ET DANS LES PLANTES

PAR

E. JOUIS et M. Th. LECACHEUX
Station Agronomique, Rouen.

Introduction.

Le dosage du calcium et du magnésium par le complexon est actuellement la méthode la plus généralement adoptée.

Il présente cependant des difficultés, le complexon formant des chélates avec presque tous les métaux.

On dispose de trois solutions :

1° Trouver un indicateur spécifique du métal à doser.

2° Faire varier le pH et complexer ou éliminer les métaux gênants pour rendre plus spécifique un indicateur.

3° Isoler le métal à doser.

Il peut être nécessaire de combiner ces trois procédés, mais pour conserver au dosage complexométrique la simplicité qui fait sa valeur, toutes les opérations d'élimination doivent être faciles et rapides.

Indicateurs de métaux.

Indicateurs pour Ca. — Nous n'avons pu étudier tous les indicateurs proposés, faute de pouvoir nous les procurer. Nous nous sommes bornés à deux qui nous ont semblé intéressants : la murexide (surtout le mélange murexide-vert naphtol B) et le noir bleu au chrome.

Indicateurs pour Mg. — Nous avons essayé quelques indicateurs spécifiques, le violet de pyrocatéchine, le magnésion, le jaune Thiazol et un indicateur non spécifique, mais d'une très grande sensibilité : le noir ériochrome T.

Nous avons étudié, dans le cas de l'emploi de ce colorant, les éliminations et les complexations indispensables.

Problèmes d'analyse Ca-Mg.

Plusieurs cas peuvent se présenter :

1. Le magnésium se trouve en très faibles quantités par rapport au calcium : cas des craies de Seine-Maritime et des chaux en provenant, cas des calcaires glauconnieux, etc.

2. Le magnésium se trouve en quantités sensiblement égales au calcium : dolomies ou chaux magnésiennes.

3. Le magnésium varie du dixième à la moitié du calcium présent, c'est le cas de végéatux dont nous avons eu récemment à nous occuper : choux, salades, etc.

Pratiquement, cela se résume à deux cas :

1° Dosage de Mg à l'état de traces en présence de beaucoup de Ca.

2° Dosage de Mg en quantité importante mais généralement inférieure à celle du Ca présent.

Les éléments susceptibles de gêner sont le fer et surtout le manganèse, les autres métaux étant à l'état de traces.

Utilisation des indicateurs pour le calcium.

Le plus employé est la murexide. Nous ne nous étendrons pas sur tout ce qui a été dit de cet indicateur, l'imprécision du virage est constatée par tous ceux qui pratiquent les dosages complexométriques.

Cette imprécision est surtout gênante dans le cas du dosage de traces de Mg en présence de beaucoup de Ca. Si l'on dose, comme le veut la méthode classique, la somme Ca + Mg et d'autre part le Ca seul, l'erreur faite sur la lecture du Ca peut fausser du simple au triple le dosage de Mg.

L'avantage de la murexide est sa spécificité assez bonne à l'égard du Ca (à pH 12). Le Mg gêne peu, le fer et le Mn n'ont pas d'influence sur le dosage ; Ni - Co - Zn sont facilement complexés par K C N.

Pour conserver ces avantages nous avons essayé une variante : le mélange murexide/vert naphtol B.

On mélange une partie de murexide et deux parties de vert naphtol B en dilution solide dans le chlorure de sodium (50 fois NaCl, soit 0,1 g murexide + 0,2 g vert naphtol B pour 15 g de NaCl).

Cet indicateur s'emploie au pH 12 comme la murexide. Le virage se fait du gris rosé au bleu violet, il est très net. Il faut cependant noter que d'un mélange de colorant à l'autre, il peut y avoir des variations de teinte, le virage peut se faire du rose au lilas. Il faut préparer un témoin de coloration en titrant une solution d'un sel de Ca de concentration connue par le complexon.

Nous avons comparé le virage à la méthode du Dead Stop end Point en employant pour une même solution de Ca, le titrimètre « Tritravit » de Prolabo. La fin de la réaction correspond exactement à la teinte lilas.

Notons en passant que les titrages de Ca par le complexon au Titravit sont très bons, même pour des liqueurs $\frac{M}{100}$, mais nous n'avons pas pu obtenir de dosages corrects des mélanges Ca, Mg.

Le titrage de Ca par le mélange murexide/vert naphtol B n'est pas influencé par la présence du fer et du Mn, mais une quantité importante de Mg fournit un virage qui s'étale et est un peu plus difficile à saisir.

En conclusion, le mélange murexide/vert naphtol B est très supérieur à la murexide seule comme indicateur de Ca. L'avantage de ce colorant est que de petites quantités de Fe et Mn ne gênent pas.

Bleu noir au chrome R. F. de Francolor. — Après la lecture de l'article de V. Kuhn « Progrès récents dans les dosages compléxométriques de Ca et Mg (Chimie Analytique (40) n° 5 1958 p. 340), nous avons essayé le noir bleu au chrome.

L'usine Francolor d'Oissel, a bien voulu nous préparer le sel de sodium de ce colorant.

Ses conditions d'emploi ont été étudiées de façon très détaillée par V. Kuhn ce qui nous permet de faire les remarques suivantes, avec application aux cas qui nous intéressent.

A pH 12 le bleu au chrome vire du pourpre au bleu franc lorsque le Ca est fixé par le complexon. Le virage est impossible à saisir s'il y a du fer et du manganèse dans la solution ; il est indispensable de les éliminer.

Au pH indiqué, Mg se trouve précipité à l'état d'hydroxyde et fixé au colorant.

Lorsqu'il y a peu de Mg, Ca entrant en combinaison avant Mg lors du titrage au complexon, il est possible de voir nettement le virage au bleu. Quand il y a une proportion élevée (dolomie, cendres de végétaux) la laque violet-pourpre formée par le colorant et l'hydroxyde de Mg gêne l'appréciation du point final.

On tourne la difficulté en mettant un petit excès de complexon avant de porter la solution au pH 12. Ajouter le colorant, amener à volume connu, filtrer et doser sur une partie aliquote l'excès du complexon, par une solution titrée de Ca. Cette méthode donne généralement des chiffres corrects.

Lorsqu'on n'utilise pas ce dosage en retour il est quand même possible de doser Ca et Mg sur la même prise d'essai. On dissout l'hydroxyde de Mg par HCl dès que le titrage de Ca est terminé, on amène la solution à pH 6, puis à pH 10-10,5 avec le tampon NH_4Cl/NH_4. On ajoute un peu de noir eriochrome qui réagit comme le bleu noir mais plus nettement.

Le dosage est assez bon, mais pour des dosages de traces la superposition des deux colorants donne une proportion colorant/métal à doser trop forte et la sensibilité du virage est diminuée.

En conclusion, le bleu noir au chrome est un bon indicateur du calcium, mais l'obligation d'éliminer Fe et Mn avant le dosage est astreignante. En outre' dès que la quantité de Mg atteint 0,5 mg, le précipité d'hydroxyde apparaît et adsorbe le colorant. Peu gênant lorsqu'il est très faible, ce précipité coloré rend la lecture imprécise dès que Mg est présent en quantité importante.

Enfin, les dosages successifs de Ca et Mg sur une même prise d'essai sont possibles, mais donnent peu de précision dans le cas de traces de Mg en présence de beaucoup de Ca. Il est préférable de doser Ca seul par le noir bleu et la somme Ca + Mg par le noir eriochrome, mais il y a alors la petite incertitude due à l'emploi de deux colorants différents.

Utilisation des indicateurs pour le magnésium.

Le violet de pyrocatéchine. — Ce colorant donne un complexe bleu avec le Mg, il n'en donne pas avec le fer, l'alumine ou le Ca.

En réalité, il faut que la quantité de Ca soit nettement plus faible que celle du Mg. On peut complexer Ca par le mannitol, le sucre, ou l'éliminer Les résultats sont beaucoup moins bons qu'avec le noir eriochrome.

Le magnésion (**paranitrobenzèneazorésorcinol**) est un indicateur spécifique du magnésium avec lequel il donne une coloration bleue à pH 11. Le colorant se fixe sur l'hydroxyde de Mg et forme une laque. Le complexon peut soustraire Mg à cette laque, il y a disparition de la couleur bleue et passage au violet pâle.

Les virages sont bons mais moins sensibles que ceux du noir Eriochrome.

Pour utiliser ce réactif il faut se rappeler que des quantités importantes de sels ammoniacaux gênent. Nous avons employé le tampon borate de sodium/soude, à pH 11.

Pratiquement, il faut isoler le magnésium car le calcium présent est titré avant Mg. Ce colorant ne présente donc pas d'avantage sur le noir Eriochrome.

Le jaune thiazol est un autre indicateur spécifique de Mg avec lequel il donne une laque d'un beau rouge dans les mêmes conditions que le magnésion. La réaction est encore plus sensible que celle du magnésion, mais il ne peut pas être question de titrer au complexon la laque jaune thiazol/Mg. Si on essaie de l'isoler par centrifugation ou filtration, puis de la dissoudre (ce qui est difficile) elle ne cède pas le Mg au complexon.

Les indicateurs du Mg : magnésion et jaune thiazol ne peuvent donc pratiquement être retenus pour le dosage de Mg par le complexon. Ils peuvent par contre se prêter aux colorimétries si l'on réussit à maintenir le précipité en suspension, ce qui est possible dans le cas de faibles quantités.

Pour des quantités supérieures à celles qui peuvent être colorimétrées, suggérons la méthode suivante : centrifuger la laque rouge Mg/jaune thiazol dans des tubes coniques bien calibrés ; la hauteur du précipité est proportionnelle au Mg présent.

Le dosage doit être réalisé à pH 11 et en présence de mannitol qui complexe Ca.

Utilisation du noir Eriochrome T.

Les colorants que nous venons d'étudier ne donnant pas de résultats vraiment intéressants, nous avons repris l'indicateur classique : le noir Eriochrome. Ce colorant a le défaut de ne pas être spécifique, il donne les mêmes colorations avec Mg-Zn-Cd-Pb-Mn-Hg et les changements de couleur sont rapides et réversibles. Avec d'autres métaux : Fe-Ni-Co etc. il donne des réactions lentes et irréversibles.

Lorsqu'on emploie le noir eriochrome, il est indispensable d'éliminer le fer et surtout Mn. En présence de quantités, même faibles de fer et Mn, les virages sont difficiles à saisir et les résultats sont trop élevés. Zn-Cd-Co-Ni-Cu-présents à l'état de traces, sont facilement complexés par le cyanure de potassium. Lorsque Ca et Mg sont présents on a toujours la somme Ca + Mg.

Si les éliminations et complexations nécessaires sont réalisées on obtient un virage d'une grande sensibilité et l'on peut employer des solutions $\frac{M}{1000}$ ou bien, si l'on emploie la solution $\frac{M}{100}$ on peut terminer les dosages avec une burette de précision graduée en 1/100. Dans les meilleures conditions de nos dosages nous pouvons apprécier 4 γ dans le vase de titration.

Lorsqu'on dose des traces de Mg en présence de grandes quantités de Ca, un bon procédé consiste, après avoir amené la solution au pH 10,5, à ajouter la quantité de complexon correspondant au calcium ; on apporte alors le noir eriochrome en quantité faible, on titre avec la burette de précision en employant le complexon $\frac{M}{100}$. Les virages sont très bons.

La somme Ca + Mg dans ces conditions peut être très exacte. Toutefois le dosage du Ca seul, étant moins précis, il nous a semblé indispensable d'isoler Mg. Nous avons essayé les méthodes ci-après :

1º Précipitation de l'hydroxyde de Mg à pH 12 en présence de mannitol comme complexant de Ca et centrifugation. Il y a entraînement de calcium. On lave le précipité avec une solution alcalinisée de mannitol. Il ne faut pas pousser les lavages car il y aurait dissolution de Mg. En titrant d'une part Ca, d'autre part Mg, on a une somme exacte, mais il peut y avoir pour chacun des deux éléments, manque ou surcharge selon le nombre des lavages.

En outre, s'il y a du phosphate de chaux dans le produit, ce phosphate se trouve entraîné par le précipité de magnésie.

La méthode est meilleure si l'on précipite $Mg(OH)_2$ en présence d'un petit excès de complexon. Il faut alors faire les deux titrages en retour, celui de Mg après redissolution, ajustage de pH etc. ce qui n'est pas encore pratique.

2º Nous avons donc repris l'élimination de la chaux par la méthode classique, la précipitation à l'état d'oxalate.

Le dosage de Mg en présence d'oxalate de NH_4 est mauvais. La présence d'une grande quantité de sels ammoniacaux gêne le virage. Nous avons pensé que l'oxalate de Na éviterait cet inconvénient. On opère comme suit :

Précipiter le calcium par l'oxalate de Na à pH 4,8 (tampon acéto-acétique) ; dans ces conditions il n'y a pas formation d'oxalate de Mg. Eliminer le précipité d'oxalate de Ca et titrer le Mg au complexon. Lorsqu'il y a un très petit excès d'oxalate, le titrage est possible dans ces conditions.

En présence d'un gros excès, il faut éliminer l'ion oxalique, ce qui se réalise très facilement en passant la solution sur une résine anionique (Duolite A 30).

Tous les éléments gênants étant éliminés, le dosage de Mg seul s'obtient avec des virages parfaits.

Comme on emploie le même colorant et le même pH pour le dosage de la somme Ca + Mg et pour le dosage de Mg, la précision est très bonne.

Elimination du fer et du Mn.

Nous avons indiqué que cette élimination était indispensable sans mentionner le procédé. Nous avons essayé deux méthodes :

1. Elimination par passage sur une résine anionique (Duolite A 30) en présence de citrate. Le fer et le Mn se trouvent fixés à l'état de complexes citriques, le phosphate est également fixé, mais il ne faut pas qu'il reste un trop grand excès d'acide chlorhydrique en provenance de l'attaque et il ne faut pas qu'il y ait trop de manganèse.

De plus, les résines ayant fixé des phosphates ou citrates de fer et de Mn sont difficiles à récupérer.

2. Nous avons essayé l'élimination par le diéthyldithiocarbamate. Le procédé est simple et très rapide. On pourrait préférer une résine dans le cas où il y a plus de fer que de manganèse et lorsqu'on veut éliminer les phosphates, mais cette dernière élimination ne nous semble pas indispensable.

En milieu acide, le diéthyldithiocarbamate forme des complexes avec un grand nombre de métaux. Ces complexes colorés sont éliminés par agitation dans une ampoule à décanter avec de l'alcool isoamylique.

Au pH 4,8-5 l'élimination du manganèse est complète. On se placera à ce pH puisque c'est l'élément le plus gênant.

Le fer en très grosse quantité ne se trouverait peut-être pas totalement éliminé. D'après Charlot et Beziers il faudrait opérer au pH 3.

Dans les conditions de nos dosages, le fer est éliminé en même temps que le manganèse, ainsi que d'autres métaux présents à l'état de traces.

Nous avons utilisé cette méthode pour des marnes, des chaux magnésiennes, des craies glauconnieuses et des cendres de plantes et dans tous les cas le fer était éliminé. Pour des laitiers, d'après V. KUHN, il faudrait faire une extraction du fer par l'acéthylacétone.

Méthodes adoptées.

Amendements. — Attaquer 1 g de calcaire ou de chaux par le moins possible d'acide chlorhydrique au demi. On s'assure que toutes les parties calcaires sont dissoutes. Filtrer.

Il est généralement inutile d'insolubiliser la silice, il vaut mieux éviter l'attaque du sable et du silex en ne prolongeant pas trop le contact avec l'acide chlorhydrique.

Faire bouillir pour chasser CO_2. Laisser refroidir. Ajuster à 100 ml dans un ballon jaugé.

Plantes. — Pour les échantillons de plantes, prendre 2 g de matière sèche. Calciner jusqu'à cendres blanches, dissoudre les cendres par HCl, aller doucement à sec sur une plaque chauffante pour insolubiliser la silice et éliminer l'excès d'HCl. Reprendre par l'eau bouillante. Transvaser dans un ballon de 100 ml, laisser refroidir, ajuster et filtrer. Faire les déterminations sur des parties aliquotes.

Dosage préliminaire. — Sur 1 ml, doser Ca au complexon $\frac{M}{100}$ au pH12 en présence de murexide/vert naphtol. On a ainsi une bonne approximation du Ca présent. Faire un autre dosage en présence de tampon NH_4Cl/NH_4 et du noir eriochrome. Le virage généralement très douteux, donne une idée de l'ordre de grandeur de la somme Ca + Mg.

On sait donc sur quelle quantité faire le dosage définitif. On préléve généralement 5 ml pour les amendements et 20 ml pour les cendres de plantes. Verser cette prise dans une ampoule à décanter. Ajouter 10 ml de tampon acétoacétique pH 4,8. Vérifier le pH et l'ajuster avec 1 goutte ou 2 de soude, ou un peu plus de tampon, pour être à 4,8/5. Ajouter 5 ml d'une solution à 2 p. 100 de diéthyldithiocarbamate, 5 ml ou 10 ml d'alcool isoamylique (selon l'intensité de la coloration). Agiter, laisser déposer. L'alcool isoamylique contenant les diéthyldithiocarbamates métalliques surnage.

Filtrer la solution aqueuse sur filtre mouillé et recueillir dans un ballon jaugé de 100 ml pour les amendements et de 50 ml pour les plantes.

Faire un lavage de la partie alcoolique avec du réactif acéto-acétique. Compléter au trait de jauge.

Prélever une partie aliquote (qui peut être exactement la moitié) et la verser dans un vase de titrage. Diluer à 150 ml. Mettre une faible quantité de cyanure de potassium pour complexer les traces métalliques apportées par les réactifs, puis 5 ml de tampon NH_4Cl/NH_4, le noir ériochrome (en petite quantité, à l'aide d'une petite mesure). Titrer avec le complexon $\frac{M}{100}$. On a la somme Ca + Mg.

Dans le ballon jaugé où est restée la seconde moitié de la liqueur ajouter 2 à 5 ml d'oxalate de soude saturé. Porter 5 minutes sur une plaque chauffante. Refroidir. Compléter le volume et laisser déposer 2 heures. Filtrer. Prélever une partie aliquote (la plus élevée possible, lorsqu'il n'y a que des traces de Mg).

Passer cette prise sur une colonne garnie de résine anionique (Duolite A 30, 1 à 2 cm de hauteur) pour éliminer l'excès d'oxalate. Laver la résine avec quatre fois le volume d'eau correspondant à la prise ayant passé sur la résine. Recueillir le tout dans le vase où se fera la titration.

Ajouter le cyanure, le tampon (5 ml), le noir ériochrome et titrer. On a Mg.

En tenant compte de toutes les dilutions, calculer d'une part la somme Ca + Mg pour 1 g du produit et d'autre part Mg (en ml de solution de complexon).

Faire la différence et calculer les résultats en Ca ou CaO et Mg ou MgO p. 100.

RÉSUMÉ

Lors du dosage du magnésium et du calcium dans les amendements, les sols ou les plantes on se trouve placé devant deux cas : ou le Mg est à l'état de traces en présence de beaucoup de Ca, ou le Mg est en quantité importante, mais généralement inférieure à celle du Ca présent.

Les auteurs ont étudié divers colorants pour préciser une méthode satisfaisante de dosage par le complexon. Murexide, murexide mélangée avec du vert naphtol B, bleu noir au chrome pour le calcium. Violet de pyrocatéchine, magnésion, jaune thiazol, noir ériochrome T pour le magnésium.

Le calcium est dosé au complexon M/100 à pH 12 en présence de Murexide/Vert naphtol et la somme Ca + Mg au complexon M/100 en présence de noir ériochrome après élimination du Fer et du Manganèse par le diéthyldithiocarbamate.

SUMMARY

Investigations on the use of different colouring agents for the complexiometric determination of calcium and magnesium in amendments, soils and plants.

In analyses of magnesium and calcium in amendments, soils or plants, the Mg either occurs in traces in relation to the high amounts of Ca, or Mg is present in considerable amounts though generally less than the Ca.

Different colouring agents were investigated with a vies to deviwing a satisfactory method for analysis by means of complexone, including murexide alone or mixed with naphtole-green B, or chromic black-blue for calcium and pyrocathechine violet, magnesion, thiazol yellow or erichrome black T for magnezium.

The calcium is determined by M/100 complexone at pH 12 in presence of murexide/naphtole green B, and Ca + Mg by M/100 complexone in presence of erichrome black T after removal of iron and manganese by diethyldithiocarbamate.

ZUSAMMENFASSUNG

Genauere Angaben über die verschiedenen Indikatoren bei der komplexometrischen Calcium und Magnesium-Bestimmung in den Bodenverbesserungsmitteln, in den Böden und in den Pflanzen.

Bei der Magnesium und Calcium-Bestimmung in den Bodenverbesserungsmitteln, in den Böden und in den Pflanzen hat man zwei Fälle : entweder ist das Mg als Spuren vorhanden bei Gegenwart grosser Mengen von Ca oder

das Mg ist in beträchtiger Menge vorhanden doch gewöhnlich in geringerer Menge als das Ca

Die Verfasser haben verschiedene Indikatoren untersucht um ein zufriedenstellendes komplexometrisches Verfahren auszuarbeiten : Murexid, Murexid mit β Naphtol.grün, Chromblauschwarz für das Calcium, Brenzcatechinviolett Magnesion, Thiazolgelb, Eriochromschwarz T für das Magnesium.

Das Calcium wird mit Komplexon M/100 bei pH 12 und bei Gegenwart von Murexid β Naphtolgrün bestimmt und die Summe Ca + Mg mit Komplexon M/100 bei Gegenwart von Eriochromschwarz nach Entfernung des Fe und Mn durch Diäthyldithiocarbamat bestimmt.

Точные указания относительно употребления различных красящих веществ в комплексиометрическом определении кальция и магния в удобрениях, в почвах и в растениях.

Е. ЖУИС и Т. ЛЕКАШЭ. (Руан.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

При количественном определении магния и кальция в удобрениях, в почвах и в растениях встречаются два случая : или Mg находится в очень слабых количествах в присутствии значительных количеств Ca, или же Mg назодится в значительном количестве, но обычно более слабом, чем присутствующий Ca.

Авторы изучили различные красящие вещества, чтобы найти удовлетворительный способ определений при иомощи комплексона. Мюрексид (murexide, fémin.), мюрексид смешанный с vert naphtol B (зеленый нафтол B), черный голубой хромовый (bleu noir au chrome) — для кальция. Videt de pyrocatéchine, магниевый, желтый тиазол (jaune thiazol), черный эриохром T (noir ériochrome T) — для магния.

Кальций определяется комплексоном M/100 при pH 12 в присутствии мюрексид/зеленый нафтол и сумма Ca + Mg определяется комплексоном M/100 в присутствии черного эриохрома после удаления железа и марганца диэтилдитиокабаматом.

Le Directeur-Gérant : B. LACLAVIÈRE.

Imprimerie BUSSIÈRE à Saint-Amand (Cher), France. — 17-5-1960.
Dépôt légal : 2e trimestre 1960. N° d'impression : 885.

631. 86/87 : 631-421

EXPÉRIMENTATION EN PETITS VASES DE VÉGÉTATION TYPES D'ESSAIS POUR TESTER L'EFFICACITÉ DES ENGRAIS HUMIQUES

PAR

R. CHAMINADE
Station centrale d'Agronomie, Versailles.

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Technique des essais en petits vases de végétation.
Apports d'engrais.
Plantes d'expérience.
Semis.
Coupe.
II. — Test d'efficacité d'un engrais humique.
Principe.
Résultats.

L'expérimentation en vases de végétation tient une place importante dans la Recherche Agronomique. Elle constitue un stade intermédiaire entre les recherches de Laboratoire et l'expérimentation en plein champ.

En permettant de contrôler un certain nombre de facteurs de croissance (alimentation en eau, volume de terre exploré, etc.) elle réalise un ensemble de conditions favorables à la recherche scientifique. Ainsi que le souligne A. DEMOLON (1) « c'est un moyen d'étude commode, particulièrement adapté à certaines recherches physiologiques, comme l'influence d'un facteur déterminé sur l'évolution de la plante, les autres étant rendus égaux ».

Cette technique a été très largement utilisée par de nombreux expérimentateurs.

Toutefois des difficultés d'ordre matériel en limitent souvent l'emploi. La dimension des vases nécessite des installations importantes et bien des recherches de nutrition minérale, notamment les interactions entre éléments, deviennent irréalisables du fait du nombre élevé de vases de végétation qu'elles exigent.

Pour permettre une plus large utilisation d'une technique irremplaçable, nous avons mis au point une méthode permettant d'expérimenter en vases de végétation de petite dimension. Cette méthode est utilisée depuis cinq ans, à la fois dans des essais sur sols et sur quartz broyé avec solutions nutritives.

Nous décrivons ici la technique utilisée sur sol et nous donnons un exemple d'application à un problème particulièrement délicat : la détermination de l'efficacité d'un engrais humique.

La technique d'essais en solutions nutritives fera l'objet d'un mémoire ultérieur.

TECHNIQUE

Les vases de végétation sont en polyéthylène de section carrée, de $9 \times 9 \times 13$ cm. Leur volume est voisin de 1 000 cc.

Les pots reçoivent un poids constant de sol sec, de l'ordre de 1 kg Ce poids peut varier suivant la nature du sol. Il est essentiel que le niveau supérieur du sol soit à une distance de 3 cm du bord supérieur du pot.

Les formules de fumure dépendent évidemment de la nature de l'essai.

Les engrais phosphatés et potassiques et, éventuellement le magnésium, le soufre et les oligoéléments sont mélangés au sol en totalité avant l'expérience.

L'azote est fractionné par apport hebdomadaire d'une solution de nitrate de calcium.

Les pots sont pesés journellement et l'humidité maintenue aux 2/3 de la capacité de saturation.

Plantes d'expérience. — La faible dimension des pots nécessite l'emploi d'un matériel végétal permettant la présence dans chaque pot d'un nombre élevé de plantes afin d'éliminer les causes d'erreur liées aux variations individuelles.

Le Ray-Grass se prête très bien à ce genre d'essais.

Il est possible d'utiliser par pot 1 000 graines correspondant à un poids de l'ordre de 2 g.

Le Ray-Grass présente d'autre part l'avantage de pouvoir être coupé en cours de végétation et de fournir ainsi en une année plusieurs séries de résultats expérimentaux.

Les coupes sont effectuées en moyenne toutes les deux ou trois semaines. Dans certains essais le nombre de coupes a atteint huit. Il n'est pas toujours possible de pousser l'expérience jusque là car, lorsque le nombre de coupes augmente l'erreur expérimentale croît.

L'expérience montre que les meilleurs résultats sont obtenus avec trois ou quatre coupes.

Dans les meilleures conditions on peut atteindre un rendement de 8 g de matière sèche par pot en 3 semaines.

Semis. — Les 1 000 graines, dont on a déterminé au préalable le poids, sont réparties uniformément sur la surface du sol humide. On les recouvre d'une couche de 1 mm d'épaisseur de sable fin que l'on humidifie en pulvérisant finement de l'eau à la surface. Les pots sont recouverts de plaques de verre et placés à une température voisine de 20°. Dans ces conditions la germination a lieu de façon très régulière et demande de huit à dix jours.

Apports d'azote. — Chaque semaine, avant l'arrosage, les quantités d'azote prévues sont ajoutées sous forme de solutions de Nitrate de Calcium. Les concentrations de cette solution sont prévues pour que les volumes ajoutés soient de 10 à 20 cc.

Coupe. — La première coupe est effectuée quatre semaines après le semis, les coupes suivantes à des intervalles de trois semaines. Ces intervalles peuvent être réduits à deux semaines pendant la période de végétation très active. Le niveau du bord supérieur du pot détermine le plan de coupe. Les trois centimètres de tige restante permettent une repousse normale de la plante.

Les échantillons sont séchés à l'étuve à 80° jusqu'à poids constant et pesés.

TEST D'EFFICACITÉ D'UN ENGRAIS HUMIQUE

De nombreux « engrais humiques » existent sur le marché, dont l'efficacité est souvent douteuse. Seule l'expérimentation culturale peut permettre d'établir cette efficacité.

L'expérimentation, en la circonstance, est particulièrement délicate du fait de la présence dans ces engrais d'éléments nutritifs : azote, phosphore, potassium...

Il a déjà été établi expérimentalement que la matière organique avait une action spécifique sur la fertilité. Le mécanisme de cette action est très complexe (2).

Il n'est légitime de conclure à l'efficacité de la matière organique d'un engrais que dans la mesure où son action fertilisante dépasse celle qui est due à la présence de l'azote ou des éléments minéraux qu'il renferme.

La technique des essais en petits vases de végétation permet d'apporter une solution à ce problème.

Le principe de l'expérimentation consiste à déterminer dans le sol étudié le rendement maximum accessible lorsque l'alimentation minérale de la plante est assurée à l'optimum.

Si la présence de matière organique permet d'élever le maximum de rendement, on pourra conclure que la différence entre les rendements maxima avec et sans matière organique est due à l'action spécifique de celle-ci.

Nous décrivons ci-dessous un essai de ce type réalisé au Centre de Recherches Agronomiques de Versailles.

L'essai portait sur un produit organique répondant à la composition suivante :

Eau ..	63,3 %
Azote ammoniacal ..	0,73 »
Azote organique ..	1,3 »
Phosphore total..	0,27 »
Potassium total..	0,02 »

L'expérience a été réalisée sur un sous-sol (horizon B) de limon.

Les apports de matière organique ont été faits aux doses 0-5 et 20 g de matière organique sèche pour 1 000 g de sol.

Les fumures minérales comportaient l'application de cinq doses d'acide phosphorique et de cinq doses de potasse à cinq niveaux d'azote.

L'acide phosphorique était apporté sous forme de phosphate monosodique et la potasse sous forme de sulfate de potassium.

Tous les pots recevaient uniformément 500 mg de sulfate de magnésie et 2 cc d'une solution d'oligoéléments renfermant par litre 0,750 g de sulfate de manganèse, 0,075 g de sulfate de cuivre et 0,050 g de sulfate de zinc.

Les différentes fumures apportées sont consignées dans le tableau suivant :

Doses en mg pour 1 kg de sol.
(*Les doses de N correspondent à l'apport hebdomadaire.*)

N	P_2O_5	K_2O
	P_0 — P_1 — P_2 — P_3 — P_4	K_4
0	0 — 50 — 100 — 150 — 200	1 000
40	0 — 50 — 100 — 150 — 200	1 000
80	0 — 50 — 100 — 150 — 200	1 000
120	0 — 50 — 100 — 150 — 200	1 000
160	0 — 50 — 100 — 150 — 200	1 000
	P_4	K_0 — K_1 — K_2 — K_3
0	200	0 — 250 — 500 — 750
40	200	0 — 250 — 500 — 750
80	200	0 — 250 — 500 — 750
120	200	0 — 250 — 500 — 750
160	200	0 — 250 — 500 — 750

L'expérience comportait au total, 135 pots.

Le semis de Ray-Grass (variété Trianon) a été effectué le 1er mai et les coupes les 31 mai, 15 juin et 30 juin.

RÉSULTATS

Les résultats sont résumés dans les six courbes ci-dessous.

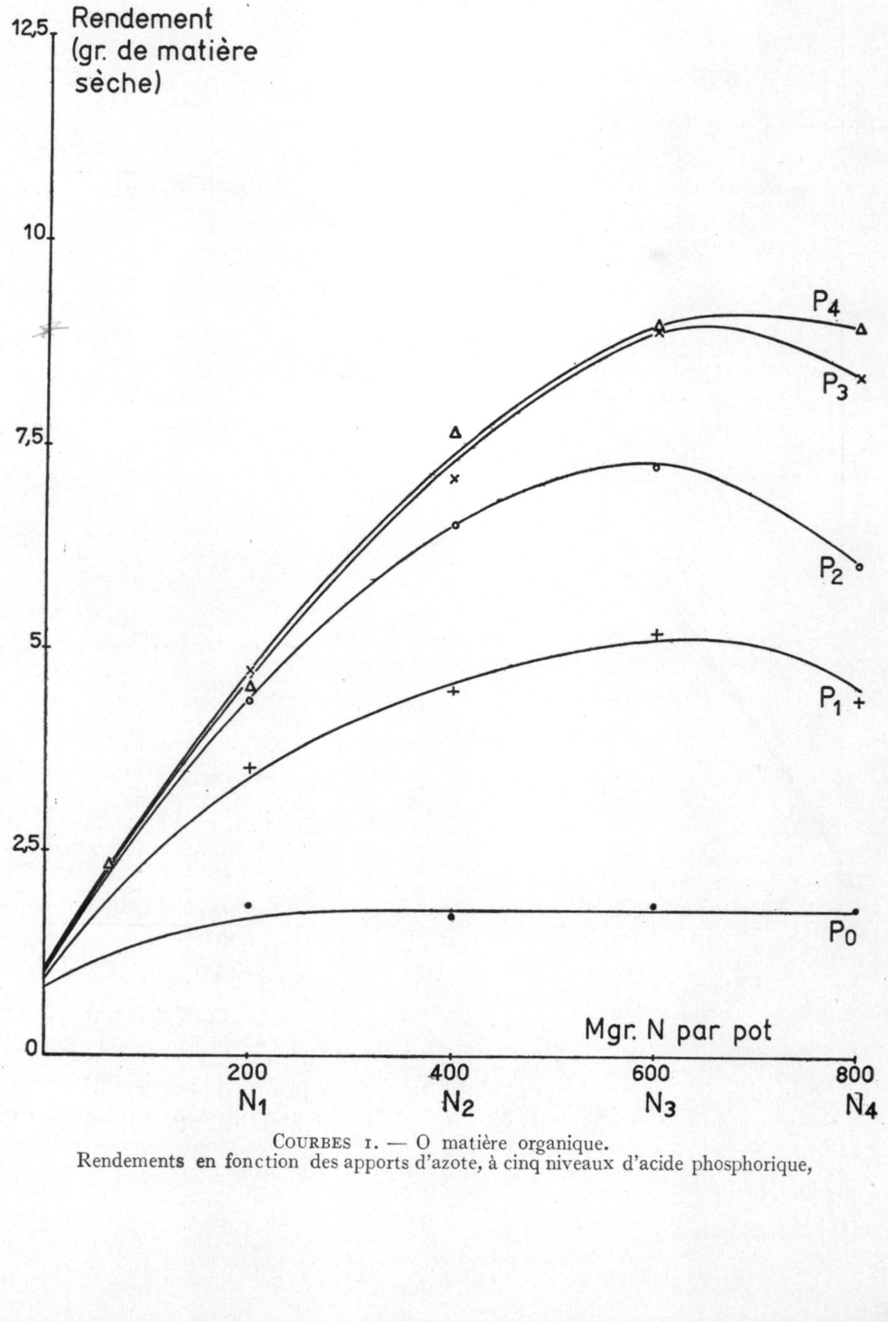
Ces courbes représentent la somme des trois récoltes en fonction des doses croissantes d'azote et aux cinq niveaux de P et de K.

Les courbes 1 et 2 ont été obtenues en l'absence d'apport organique, les courbes 3 et 4 après apport de 0,5 p. 100 de matière organique et les courbes 5 et 6 avec 2 p. 100 de matière organique.

I. — Rendements en l'absence d'apport organique.

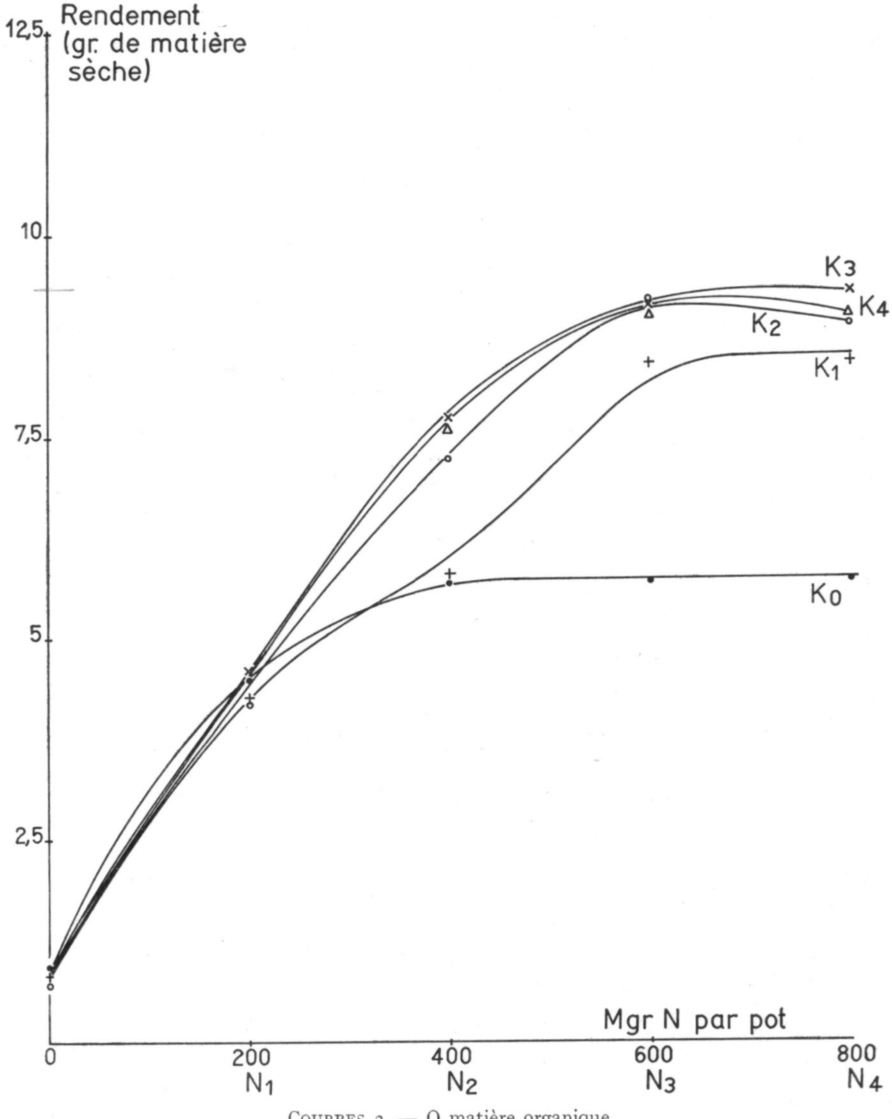
Courbes 1.

La réaction à l'azote, en l'absence d'apport d'engrais phosphatés est très faible (courbe P_0). Le phosphore joue très rapidement le rôle d'élément limitant. La réaction à l'azote s'accentue avec les fumures P_1 et P_2.



COURBES 1. — O matière organique.
Rendements en fonction des apports d'azote, à cinq niveaux d'acide phosphorique,

Par contre les deux courbes de rendement correspondant aux niveaux P_3 et P_4 sont confondues. On peut donc dire qu'à partir du niveau P_3 il n'est plus possible d'obtenir un excédent de rendement par augmentation de la fumure phosphatée.



COURBES 2. — O matière organique.
Rendements en fonction des apports d'Azote à cinq niveaux de potasse.

Par ailleurs les rendements obtenus par apport de 800 mg de N ne sont, en aucun cas, plus élevés que ceux correspondant à l'apport de 600 mg.

Enfin, la quantité de potasse apportée dans cette série d'essais (1 000 mg par pot) était largement suffisante (comme le montrent les courbes 2) pour couvrir les besoins des récoltes.

Il est donc permis d'affirmer que le rendement maximum observé (9,2 g de matière sèche) ne pouvait être accru par aucun des éléments N, P, K.

Ce rendement représente ainsi le maximum accessible dans le sol donné par application d'une fumure minérale complète.

Courbes 2.

Ces courbes confirment les résultats précédents. La potasse joue le rôle de facteur limitant, plus tardivement que l'acide phosphorique. Les réserves potassiques du sol sont relativement plus élevées que ses réserves phosphatées.

Les courbes K_2, K_3, K_4 sont confondues, ce qui prouve qu'à partir de la dose K_2 (500 mg K_2O par pot) l'alimentation potassique est bien assurée.

Comme précédemment les rendements n'augmentent plus à partir de 600 mg d'azote. On observe le même rendement maximum que dans les essais à doses croissantes de P.

II. — Rendements en présence de 0,5 p. 100 de matière organique.

Courbes 3.

Au niveau P_0, la réaction à l'azote est plus marquée qu'en l'absence d'apport organique. Ce fait provient de ce que la matière organique apporte une dose notable d'acide phosphorique assimilable.

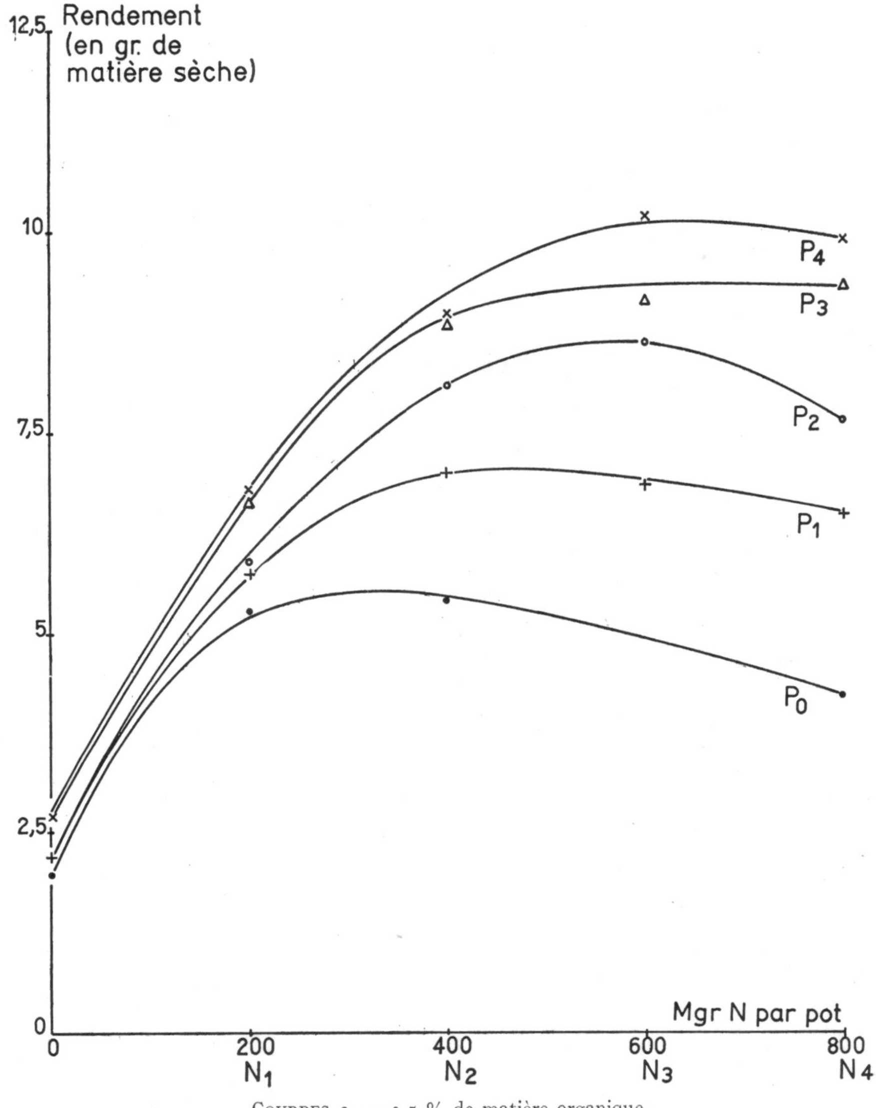
Cette quantité est toutefois insuffisante puisque la réaction à l'azote croît lorsque les apports d'acide phosphorique, par la fumure minérale, augmentent.

La courbe P_4 est encore décalée vers les rendements supérieurs par rapport à la courbe P_3 pour les fortes doses de N. Il n'est pas permis d'affirmer que les plantes n'auraient pas bénéficié d'apports d'acide phosphorique supérieurs à P_4.

Quoi qu'il en soit, le rendement maximum observé dépasse ici celui obtenu en l'absence d'apports organiques. Il atteint 10,2 g de matière sèche soit une augmentation de 10,8 p. 100.

Comme il a été établi précédemment que dans les sols sans matière organique, le rendement plafonnait à 9,2 g et qu'aucun apport minéral

ne pouvait provoquer d'accroissement, on peut affirmer que la différence des rendements est attribuable à la fraction organique de l'engrais ajouté.

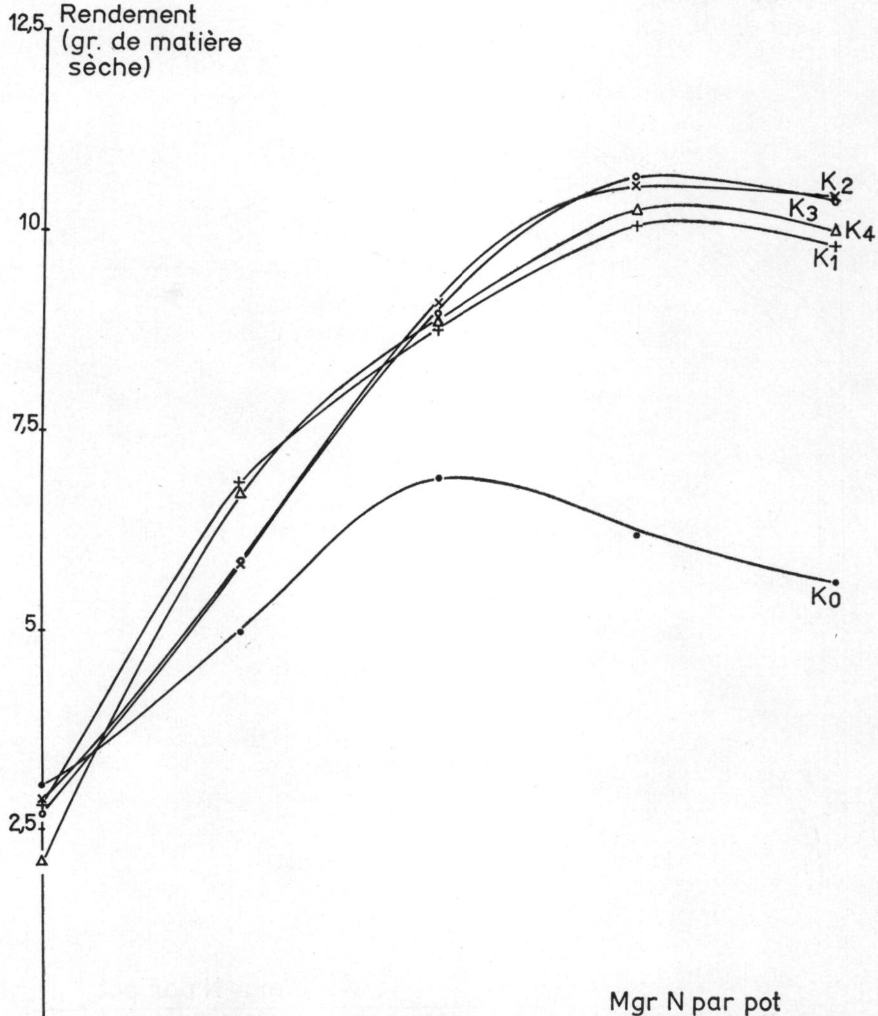


COURBES 3. — 0,5 % de matière organique.
Rendements en fonction des apports d'azote à cinq niveaux d'acide phosphorique.

Courbes 4.

Les conclusions rejoignent celles tirées des courbes 3. La réaction à l'azote au niveau K_0 est limitée par la richesse insuffisante en K.

Par contre les courbes correspondant aux niveaux K_1, K_2, K_3, K_4 sont confondues, ce qui montre qu'à partir du niveau K_1 l'alimentation potassique est suffisamment assurée.

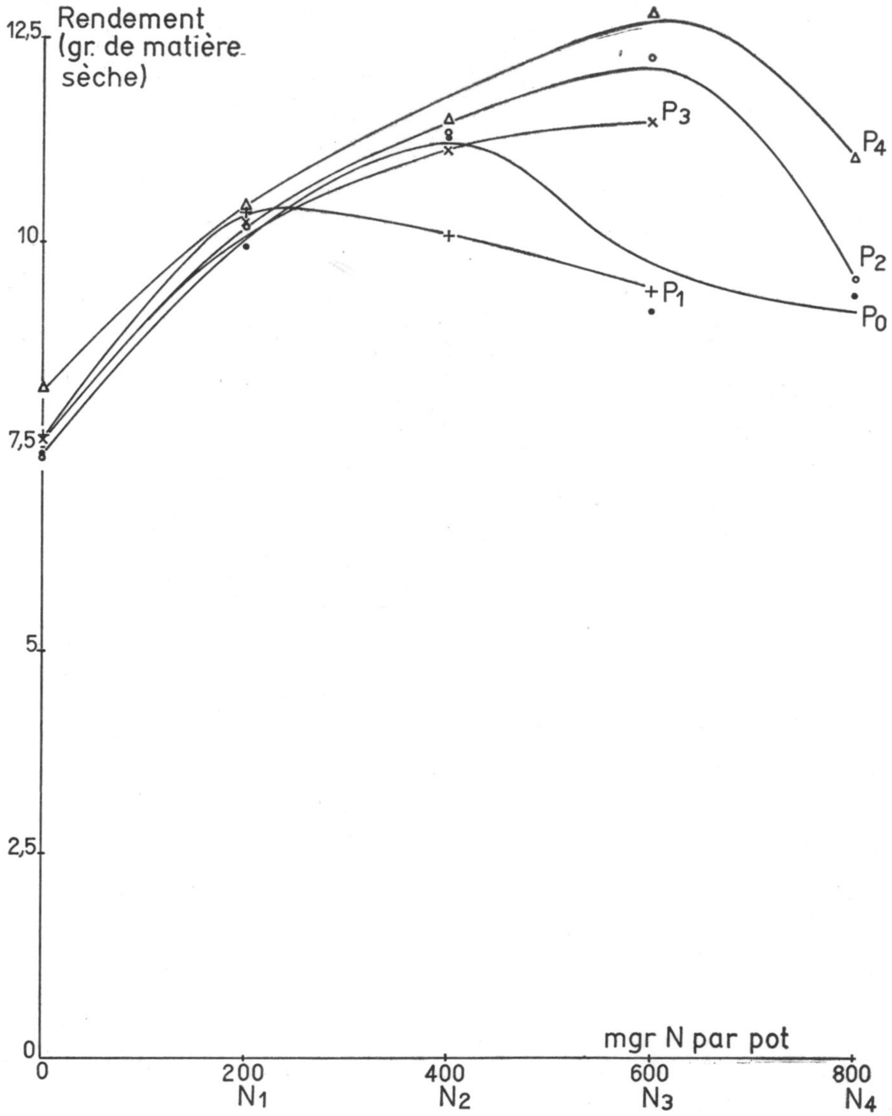


COURBES 4. — 0,5 % de matière organique.
Rendements en fonction des apports d'Azote à cinq niveaux de potasse.

Le rendement plafonne à partir de 600 mg d'azote. Le maximum accessible dans les conditions de l'expérience se situe à 10,5 g chiffre très voisin de celui observé dans les courbes 3.

III. — Rendements en présence de 2 p. 100 de matière organique.

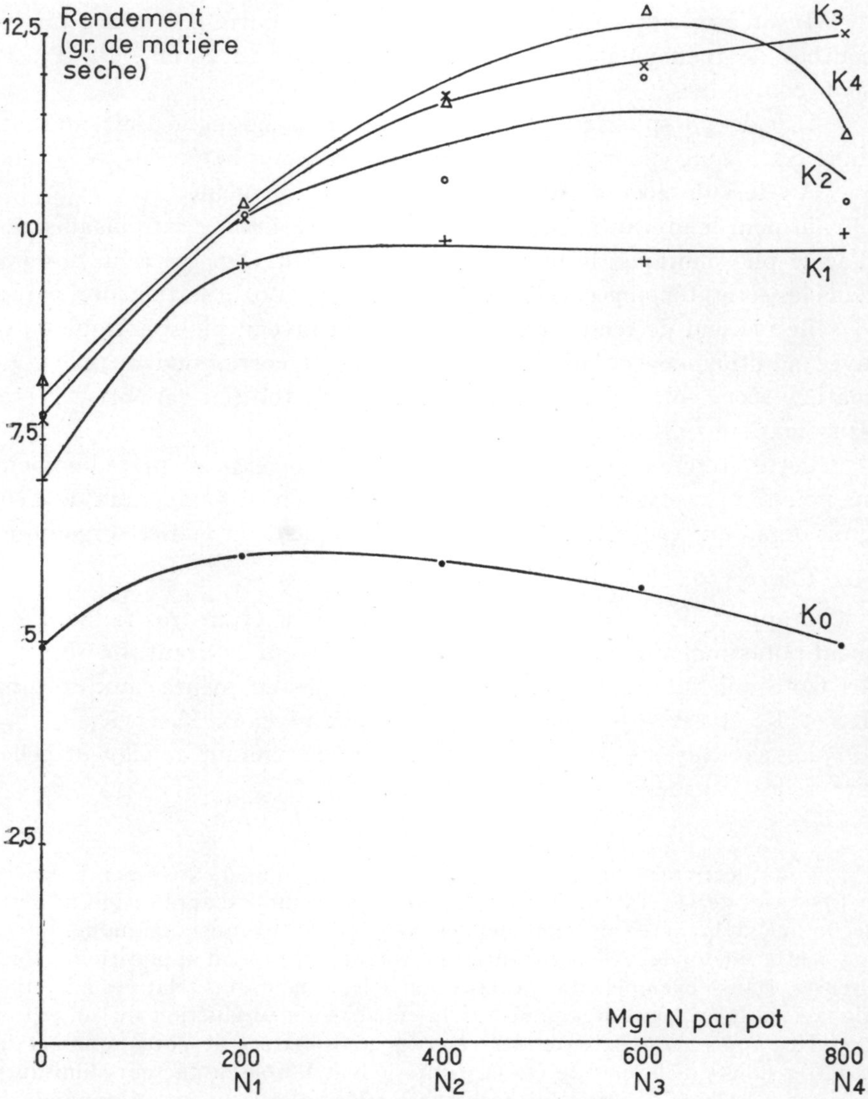
Courbes 5.



COURBES 5. — 2 % de matière organique.
Rendements en fonction des apports d'Azote à cinq niveaux d'acide phosphorique.

En l'absence d'apport d'azote minéral, le rendement atteint 7,5 g alors qu'il n'était que de 1 g dans les témoins sans matière organique. Il est impossible de distinguer par la considération de ce seul point l'effet spécifiquement humique de l'engrais de celui provenant de l'azote qu'il renferme.

L'apport de 2 p. 100 d'engrais organique correspond à 400 mg de N dont 140 d'azote ammoniacal et 260 d'azote organique. Il est remarquable de constater que ce rendement de 7,5 g de matière sèche a été



COURBES 6. — 2 % de matière organique.
Rendements en fonction des apports d'Azote à cinq niveaux de potasse.

obtenu dans les témoins sans matière organique (courbes 1) par l'apport de 400 mg d'azote nitrique. On est ainsi amené à conclure que l'azote de l'engrais organique a eu la même efficacité que l'azote nitrique. Comme il est peu vraisemblable que la totalité de cet azote (dont les 2/3 se trouvent

sous forme organique) ait été mobilisée en un temps aussi court (2 mois) on peut admettre qu'un effet humique s'est manifesté. Cette conclusion rejoint celle de travaux précédents (3) par lesquels il a été établi que la matière organique humifiée augmentait l'efficacité de l'azote.

Jusqu'à un apport d'azote minéral compris entre 200 et 400 mg les courbes de rendement correspondant aux niveaux P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 sont confondues.

L'acide phosphorique apporté par l'engrais humique est suffisant, dans cette zone, pour assurer l'alimentation phosphatée des végétaux.

Au-delà de 400 mg d'azote, les courbes divergent.

Sauf pour le niveau P_0 où la croissance a été limitée par insuffisance d'acide phosphorique, le maximum de rendement dépasse celui observé dans les séries témoins et celles ayant reçu 0,5 p. 100 de matière organique.

Le plafond de rendement est atteint au niveau phosphorique P_4 et avec addition de 600 mg d'azote minéral. Il correspond à 12,8 g de matière sèche soit une augmentation de 39 p. 100 par rapport à l'essai sans matière organique.

Cette différence, suivant le raisonnement exposé précédemment ne pouvant pas être attribuée à l'azote et aux éléments minéraux de l'engrais organique est bien due à l'action spécifique de la matière organique.

Courbes 6.

L'apport de potasse par l'engrais organique étant très faible, l'élément potassium apparaît le premier comme facteur limitant. La réaction à l'azote minéral au niveau K_0 est faible. Elle augmente aux niveaux K_1 et K_2 et est sensiblement la même aux niveaux K_3 et K_4.

Les conclusions relatives au rendement maximum rejoignent celles tirées des courbes 5.

RÉSUMÉ

Nous décrivons dans ce mémoire une technique d'expérimentation en petits vases de végétation et nous donnons un exemple d'application de cette technique à la détermination de l'efficacité d'un engrais organique.

Cette méthode d'expérimentation est susceptible d'applications nombreuses. Dans l'exemple cité ci-dessus, outre les conclusions relatives à l'action globale de la matière organique sur la capacité de production du sol, elle a permis d'apprécier le niveau des réserves phosphatées et potassiques et de montrer dans quelle mesure ces éléments jouent le rôle de facteurs limitants. Elle est donc bien adaptée aux recherches relatives à la nutrition minérale de la plante dans le sol.

SUMMARY

Types of small-pot experiments for testing the efficiency of organic fertilizers.

An experimental technique with small pots is described, and its application to the determination of the efficiency of organic fertilizers is shown on an example.

The method is suitable for various experiments, as shown by the example

in which the phosphorus and potassium reserves in the soil and limiting levels of these nutrients were determined in addition to the overall effect of organic matter on the productive capacity of the soil. The method is well adapted to investigations on the mineral nutrition of plants in the soil.

ZUSAMMENFASSUNG

Versuchsanstaltung in Kleinvegetationsgefässen zur Testierung der Wirksamkeit von Humusdünger.

In vorliegender Arbeit beschreibt der Autor eine, in kleinen Vegetationsgefässen durchgeführte Versuchstechnik und er erläutert an Hand eines Beispieles, die Handhabung derselben in Bezug auf die Festlegung der Wirksamkeit eines organischen Düngers.

Diese Versuchsmethode ist für zahlreiche Anwendungen geeignet. Ausser den Schlussfolgerungen bezüglich der Gesamtwirkung der organischen Materie auf die Ertragsfähigkeit des Bodens, die sich aus dem oben angeführten Beispiel ergibt, erlaubte sie eine Wertung des Niveau der Phosphat- und Kalireserven und veranschaulichte die Rolle welche diese Elemente als beschränkende Faktoren spielen. Sie ist daher Untersuchungen gut angepasst, die sich auf die Mineralernährung der Pflanzen im Boden beziehen.

Тип небольших сосудов для вегетационных опытов в виду определения эффективности гумусовых удобрений.

Р. ШАМИНАД (Версаль).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В этой работе автор описывает технику опытов с растениями в маленьких сосудах и дает пример применения этой техники к определению эффективности органического удобрения.

Этот мотод экспериментации может иметь разнообразные применения. В вышеуказанном примере, кроме выводов касающихся общего действия органического вещества на производительную способность земли, он позволил сделать оценку уровня запасов фосфора и калія и видеть, в какой степени эти элементы играют роль ограничивающего фактора. Следовательно, он вполне пригоден для изысканий, касающихся минерального питания растений в почве.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) DEMOLON (A.). — Croissance des végétaux cultivés. 4e Ed., p. 134, 1950.

(2) BLANCHET (R.). — Actions directes et indirectes de la matière organique humifiée sur la nutrition des végétaux vasculaires. *Ann. Agr.*, **4**, p. 449-532, 1958 (Bibliographie).

(3) CHAMINADE (R.). — Influence de la matière organique humifiée sur l'efficacité de l'Azote. *Ann. Agr.*, **2**, p. 167-192, 1958.

631. 416. 1 : 631. 461. 1/4

CONSIDÉRATIONS SUR LA MINÉRALISATION ET L'UTILISATION DES RÉSERVES AZOTÉES DU SOL

PAR

G. LEFÈVRE et G. HIROUX (1)

Station d'Agronomie, Amiens.

Introduction. Considérations théoriques.

Résultats.

A. — Application des données précédentes aux parcelles témoins en 1956.

B. — Comparaison 1956-1957 des parcelles témoins.

C. — Influence d'apports organiques et minéraux.

a) 1956.

Action du fumier.

Action d'une fumure minérale l'année de l'apport.

b) 1957.

Action du fumier.

Action du fumier et d'une fumure minérale.

Discussion et conclusions.

INTRODUCTION — CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

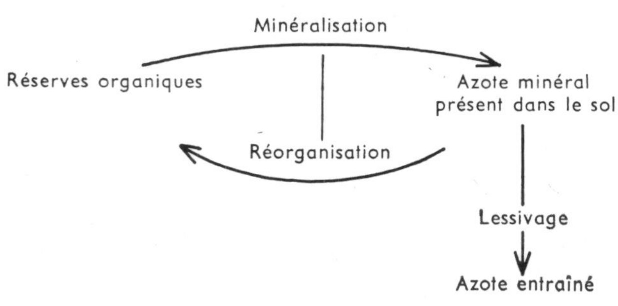
On considère généralement la minéralisation de l'azote comme un phénomène microbien régi par les conditions de milieu, température, humidité, aération. De nombreux travaux ont permis de tracer des courbes qui, partant de l'accumulation d'azote minéral en sol nu, devaient traduire l'intensité du phénomène en déduisant les pertes possibles par entraînement. Mais la discussion des résultats oblige à donner une autre interprétation, moins simple, à ces observations.

Dans le système énoncé précédemment, on est, en effet, amené à envisager la minéralisation comme un processus d'usure des réserves

(1) Avec le concours technique de M^lle^ BRACQUART.

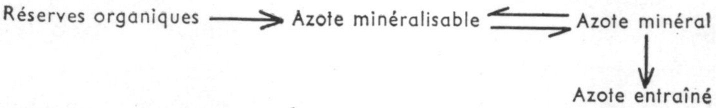
azotées dont le renouvellement ne peut être assuré que par des apports extérieurs. Or la faim d'azote consécutive à l'introduction de matières organiques riches en éléments hydrocarbonés, fournit, cependant, un exemple typique d'un phénomène inverse, c'est-à-dire de l'utilisation de l'azote minéral, à la synthèse de corps organiques, fussent-ils microbiens. Partant de ce processus, exagéré par la nature même des produits qui le suscitent, il est logique de penser que, comme tout phénomène biologique, la minéralisation donne lieu à un équilibre et que son évolution est limitée par un phénomène inverse. C'est ce que nous avons appelé, dans des mémoires précédents, la réorganisation. Admettant cet équilibre, il s'ensuit que la minéralisation à elle seule ne peut rendre compte de l'évolution des réserves, et que la teneur instantanée d'un sol en azote minéral n'est que la résultante de deux réactions inverses. Pour connaître le degré d'utilisation possible de cet azote présent dans le sol — par les plantes par exemple — il est nécessaire de connaître, en même temps, le sens de son évolution, soit vers une accumulation, soit au contraire vers une réutilisation sous des formes organiques. Cet équilibre, cependant, peut être rompu par élimination de l'azote minéral du milieu, soit par entraînement par lessivage, soit par absorption radiculaire. Suivant ce schéma, la présence d'une culture complique donc le phénomène, et en vue d'essayer de le comprendre dans un cas simple, nous avons utilisé des résultats recueillis en sols nus.

D'après ce que nous venons de voir, les différents mouvements de l'azote, dans un sol nu, peuvent être résumés ainsi :

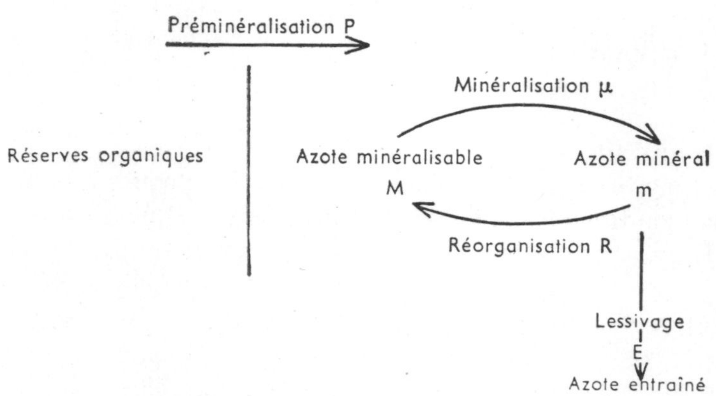


Si l'on peut doser facilement la teneur du sol en azote minéral et cela à 10 kg près à l'hectare, il faut disposer de cases lysimétriques pour connaître la quantité d'azote sortant d'un profil. Par ailleurs, les réserves organiques, variant de 3 à 6 tonnes/ha environ, leur moyen d'évaluation ne permet pas de mesurer, avec suffisamment de précision, des variations de 10 à 50 kg/ha. Il paraît donc difficile de contrôler l'intensité des diverses réactions dont on ne peut mesurer, de façon normale, qu'un terme sur trois.

L'introduction de la notion d'azote minéralisable, notion conventionnelle représentant la quantité d'azote organique susceptible de se transformer an azote minéral, après un séjour d'un mois à l'étuve, dans des conditions bien déterminées, permet de jeter un pont entre les différents termes de la réaction. Cette mesure n'est pas, cependant, entièrement artificielle car elle représente une partie des réserves organiques plus évoluée que la masse totale, puisque capable de se minéraliser rapidement Cet azote minéralisable doit être, vraisemblablement, constitué par un ensemble d'acides aminés facilement ammonifiables. Des études ultérieures devraient pouvoir le préciser. Se situant donc entre les réserves organiques et l'azote minéral nous pourrons le placer de la façon suivante :



L'azote minéralisable est une quantité mesurable. Elle peut augmenter soit par suite de l'évolution d'une partie des réserves organiques, soit, encore, par transformation de l'azote minéral. Nous appellerons le premier phénomène, prédécesseur de la minéralisation, préminéralisation, le second étant la réorganisation. Elle peut diminuer par minéralisation, ce phénomène n'ayant en rien perdu de son sens premier. On obtient alors, en sol nu, le schéma suivant.



Tout se passe donc comme si, au lieu de prendre comme repère l'ensemble des réserves organiques, trop volumineuses, nous en avions choisi une partie plus réduite, mais beaucoup plus sensible aux variations que nous voulons mesurer.

Nous avons montré dans un mémoire précédent [1] comment, de la variation simultanée de la teneur du sol en azote minéral et minéralisable, il était possible de chiffrer l'intensité de la préminéralisation, de la minéralisation, de la réorganisation et du lessivage.

Le schéma précédent nous permet les remarques suivantes :

a) L'azote minéral étant sollicité dans deux directions opposées, nous ne pouvons considérer la quantité présente dans le sol comme entièrement libre, c'est-à-dire disponible. Nous verrons, par la suite, que nous pensons que la présence du végétal perturbe considérablement l'équilibre, mais, par extrapolation, en sol nu, nous considérerons comme libre, ou utilisable, l'azote qui effectivement sort du système, c'est-à-dire l'azote entraîné.

b) L'usure des réserves organiques peut être mesurée par la préminéralisation ou, quand le système est en équilibre et avec un certain décalage, par la quantité d'azote entraîné.

c) La minéralisation, par contre, ne peut, en aucune façon, traduire cette usure des réserves. Elle est alimentée en effet d'une part, certes, par l'évolution des réserves, mais, aussi, par une fraction d'azote minéralisable récupérée par réorganisation sur l'azote minéral précédemment formé ou fourni au sol. Il y a donc un *cycle court* de minéralisation venant s'ajouter au précédent (seul pris généralement en considération), si bien qu'au cours d'une année, par exemple, la minéralisation peut être de beaucoup supérieure à l'usure des réserves.

Entre deux prélèvements la variation d'azote minéralisable résulte de deux sources d'accroissement, la préminéralisation et la réorganisation, et d'une source de diminution, la minéralisation.

Si l'on appelle :

M la quantité d'azote minéralisable présente dans le sol à un instant donné ;

m la quantité d'azote minéral présente dans le sol à un instant donné ;

P la quantité d'azote préminéralisé entre deux époques de prélèvement ;

μ la quantité d'azote minéralisé entre deux époques de prélèvement ;

R la quantité d'azote réorganisé entre deux époques de prélèvement ;

E la quantité d'azote entraîné entre deux époques de prélèvement ;

cela peut se traduire par la relation suivante :

$$\Delta M = P + R - \mu \qquad (1).$$

De même la variation d'azote minéral résulte des apports fournis par la minéralisation diminués des prélèvements représentés par la réorganisation et le lessivage :

$$\Delta m = \mu - R - E \qquad (2)$$

[1] Essai de bilan de la production d'azote minéral d'un sol en place. *Annales agronomiques*, 1958, p. 23-50.

En additionnant les équations (1) et (2) on obtient :

$$\Delta M + \Delta m = P - E \quad (3)$$

indiquant que la variation totale des quantités d'azote minéral et minéralisable représente la différence existant entre l'usure des réserves et la quantité d'azote entraîné — fait également nettement visible sur le schéma.

Cette dernière relation nous paraît très importante, car elle permet d'avoir une mesure de l'évolution des réserves lorsqu'on peut mesurer les pertes réelles dues au drainage. A l'opposé elle indique que pour connaître, au cours d'une période de temps assez courte, l'importance de la consommation des réserves, il est nécessaire de corriger les pertes par lessivage des variations de l'azote minéral et minéralisable.

L'objet de ce mémoire est d'illustrer par des chifffres ces notions théoriques. Pour cela nous utiliserons les données déjà présentées dans un de nos mémoires précédents, qui précisait le mode de calcul permettant d'évaluer les différentes phases de l'évolution de l'azote. Nous poursuivrons cette étude en regardant le comportement de ces mêmes parcelles l'année suivante. Puis considérant ces parcelles, n'ayant reçu aucun traitement, comme témoin, nous les comparerons à des parcelles voisines ayant reçu soit une fumure organique, soit une fumure organique et une fumure minérale.

Nous devons noter ici que, dans nos observations, les quantités d'azote entraîné sont importantes pour les deux raisons suivantes :

1° Les observations ont été faites sur un sol d'argile à silex de 30 cm d'épaisseur, reposant sur craie. Dans ces conditions on peut estimer que l'azote sorti du profil étudié est effectivement perdu.

2° Les drainages importants, expliquant ces entraînements, sont dus à l'absence de culture.

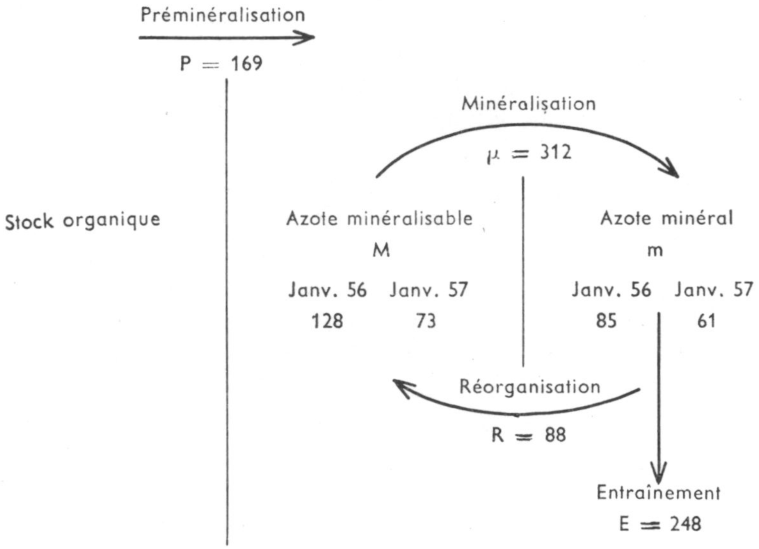
Comme nous avons dit que cet azote entraîné représentait, pour nous, celui qui est effectivement utilisable, les circonstances qui nous ont permis de l'évaluer, sans risques de remontée, nous ont été particulièrement favorables.

RÉSULTATS

A. — Application des données précédentes à des parcelles témoins en 1956.

L'application pratique des données théoriques énoncées ci-dessus peut être fournie par les chifffres obtenus dans notre précédent mémoire pour des parcelles nues n'ayant reçu, depuis 1955, ni fumure organique ni fumure minérale.

Nous les reporterons sur le schéma suivant :



Dans lesquels :

la préminéralisation...........................	P = 169 kg/ha
la minéralisation	μ = 312 »
la réorganisation	R = 88 »
l'azote entraîné..............................	E = 248 »
la variation d'azote minéralisable	ΔM = −55 »
la variation d'azote minéral......................	Δm = −24 »

On note bien que la minéralisation est nettement plus importante que la préminéralisation (presque le double), puisqu'à cette dernière s'ajoute la réorganisation et la variation (négative) de la teneur en azote minéralisable suivant la formule (1) modifiée :

$$\mu = P + R - \Delta m$$
$$312 = 169 + 88 - (-55)$$

La quantité d'azote entraîné est, également, plus importante que la préminéralisation ou usure des réserves car la variation $\Delta M + \Delta m = -55 - 24 = -79$ représentant la différence *P — E est négative*. Elle reste cependant nettement inférieure à la minéralisation.

$$E = \mu - R - \Delta m$$
$$248 = 312 - 88 + 24$$

Dans cet exemple les pertes par entraînement sont donc :

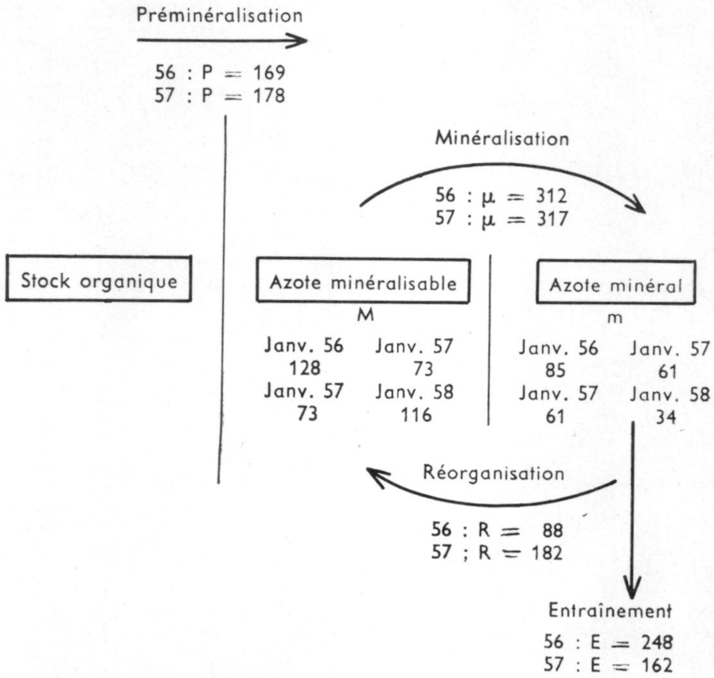
supérieures à la préminéralisation (ou usure du stock) de 79 kg

inférieures à la minéralisation annuelle de 64 kg

La connaissance, seule, des pertes d'azote dues au lessivage ne peut donc servir à mesurer ni la minéralisation, ni l'usure du stock.

B. — Évolution de la parcelle témoin nue en 1957.

Pour les deux années 1956 et 1957, la comparaison de l'amplitude des différentes phases donne le schéma suivant :



Il montre des usures de réserves — des préminéralisations — très comparables, 169 kg en 1956 et 178 kg en 1957. Celles-ci sont accompagnées de minéralisations très semblables, 312 et 317 kg.

Par contre, l'utilisation de l'azote minéralisé est très différente.

En 1956, on avait noté un entraînement important de 248 kg alors qu'en 1957 il est ramené à 162 kg, tandis que la réorganisation peu importante en 1956, 88 kg, passe en 1957 à 182 kg. Ce fait doit être attribué à des conditions climatiques différentes bien que la totalité des pluies soit plus importante en 57 qu'en 56. (Les données climatiques sont résumées dans le tableau 1).

Mais la juxtaposition de ces deux années montre que les pertes par entraînement, toujours inférieures à la minéralisation, et dépassant en 56 la quantité d'azote préminéralisée, lui sont, en 57, légèrement inférieures.

TABLEAU I

	Nombre de jours	Température maximum	Température minimum	Température moyenne	Pluies	Nombre de jours
1956						
12-1						
	60	4,57	1,92	1,37	71,7	31
12-3						
	28	13,38	3,13	8,26	6,5	3
9-4						
	32	16,61	5,00	10,81	35,4	13
11-5						
	31	20,17	8,69	14,43	70,1	12
11-6						
	29	21,15	11,34	16,24	40,2	10
10-7						
	30	22,03	12,06	17,04	75,6	16
9-8						
	35	20,83	11,52	16,17	96,8	25
13-9						
	29	19,95	10,81	15,38	37,6	15
12-10						
	33	13,11	6,10	9,60	46,9	18
14-11						
	26	7,82	3,16	5,49	23,2	9
10-12						
	36	8,07	4,0	6,04	36,8	19
15-1						
					540,8	*171*
1957						
	43	8,49	3,0	5,74	136,9	24
27-2						
	33	14,93	6,10	10,51	18,6	10
1-4						
	31	15,65	4,53	10,09	26,8	8
2-5						
	30	17,67	7,37	12,52	20,6	12
1-6						
	29	24,60	12,00	18,30	49,9	12
30-6						
	26	25,5	15,3	20,4	72,8	16
26-7						
	35	22,55	13,0	17,78	66,1	19
30-8						
	35	19,03	10,27	14,68	114,7	22
4-10						
	69	11,57	5,17	8,37	81,7	26
12-12						
	49	6,78	2,37	4,57	84,7	20
1958						
30-1					*672,8*	*169*

La relation entre la préminéralisation et l'entraînement est évidemment toujours vérifiée :

$$P - E = \Delta M + \Delta m$$

$$1956 : 169 - 248 = -55 - 24 = -79$$

$$1957 : 178 - 162 = +43 - 27 = +16$$

En ce qui concerne l'utilisation des réserves, le pourcentage reste à peu près équivalent à ce qu'il était en 1956, soit 169/5 700 = 2,95

= 3 p. 100 alors que, ramené artificiellement aux réserves, la minéralisation représenterait 315/5 700 = 5,5 p. 100. Ces chiffres montrent bien que l'on ne peut exprimer la quantité d'azote minéralisé par un pourcentage des réserves, puisque la partie de ces réserves qui a évolué a été en quelque sorte minéralisée deux fois, par suite de la récupération opérée par la réorganisation.

Nous avons déjà dit précédemment que les calculs donnant les quantités d'azote minéralisé et réorganisé indiquent, en même temps, une tendance de l'évolution des différentes formes d'azote, et qu'il semblait que, dans les *conditions de ces sols nus*, l'azote disponible ou utilisable par les cultures *devrait être représenté* par ce qui est noté comme perdu par entraînement.

La comparaison des deux années montre, alors, qu'à des préminéralisations et minéralisations, très comparables, correspondent des quantités d'azote disponibles très différenciées — soit entre les deux années 76 kg (sur 250 ou 162). On arriverait ainsi à la conclusion que, pour un taux d'usure assez constant, on obtient des quantités d'azote disponibles très variables ... observation cadrant avec les résultats pratiques.

C. — Influence des apports organiques et minéraux.

Le dispositif expérimental, dont nous avons examiné jusqu'à présent le comportement des témoins, avait été divisé en 1955 en deux, de façon à avoir des parcelles nues avec et sans fumier. Les parcelles avec fumier avaient reçu le 1er février 1955, 40 t/h, d'un fumier dosant 4,2 p. 1000 d'azote total, soit l'équivalent de 170 kg environ d'azote organique à l'hectare.

Une partie de ces parcelles fumées avait en outre reçu le 8 mars 1955 une fumure minérale, correspondant à celle normalement employée pour une culture de betteraves, soit 150 unités d'azote, 100 unités d'acide phosphorique et 150 unités de potasse.

Par la suite, tout le champ a été labouré le 7 novembre 1955, puis hersé le 10, et a reçu le 14 novembre une fumure phosphopotassique d'hiver.

En 1956, un certain nombre de parcelles traitées au fumier et bénéficiant de la fumure azotée minérale d'une betterave, ont reçu à nouveau un apport azoté correspondant à une fumure de blé, soit :

— 40 unités le 19 mars 1956.

— 30 unités le 20 mai 1956.

En 1957, pas de fumure azotée.

Les diverses combinaisons obtenues par ces traitements, sont ras-

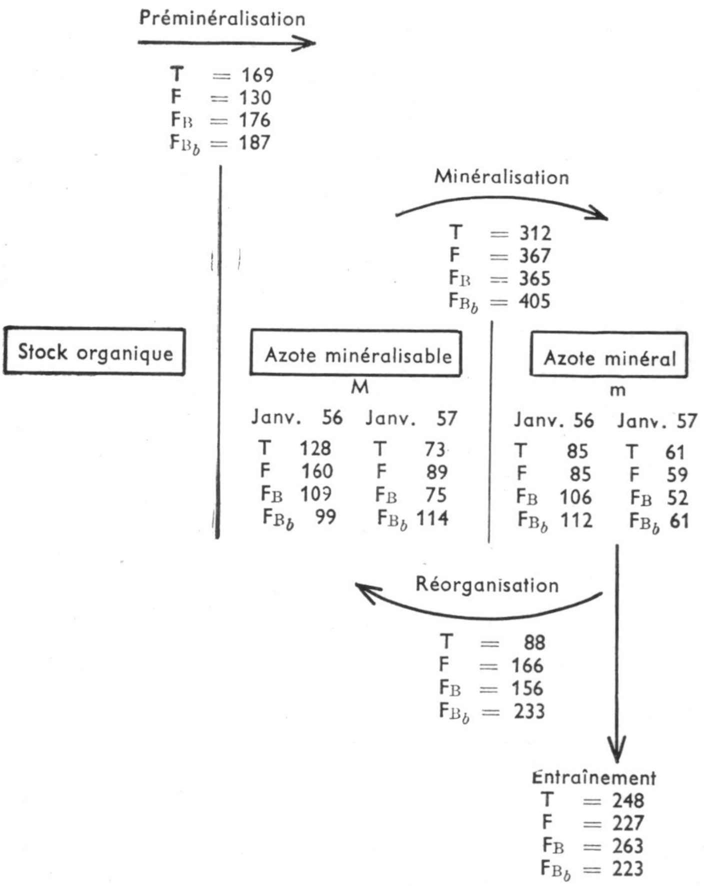
semblées dans le tableau suivant, qui donne également la signification des traitements T. F. F_B. F_{Bb}.

Rien Témoin T	Fumier 40 tonnes			1955
	Rien F	Fumure azotée minérale de la betterave : 150 N		
		Rien F_B	Fumure minérale du blé : 70 N F_{Bb}	1956

Les observations portant sur les années 1956 et 1957, les résultats obtenus en 1956 avec les parcelles F_{Bb} peuvent, seuls, indiquer l'effet *direct* d'un apport extérieur d'azote minéral.

a) **Comparaison en 1956**.

Les bilans en 1956 s'établissent de la façon suivante :



1. — INFLUENCE DU FUMIER.

Bien que les parcelles F_B aient reçu l'année précédente 150 unités d'azote minéral supplémentaires, leur comportement en 1956 est très comparable à celui des parcelles F en ce qui concerne la minéralisation et la réorganisation, mais est différent pour la préminéralisation et l'entraînement.

Par rapport aux témoins, la présence de fumier se manifeste donc en seconde année après l'apport, par une minéralisation plus importante.

$$\mu(F) - \mu(T) = 367 - 312 = 55$$
$$\mu(F_B) - \mu(T) = 365 - 312 = 53$$

Ces deux chiffres remarquables par leur similitude, font attribuer au fumier un supplément de minéralisation d'une cinquantaine de kg d'azote.

Mais, et cela est logique, la réorganisation est également augmentée de :

$$R(F) - R(T) = 166 - 88 = 78$$
$$R(F_B) - R(T) = 156 - 88 = 58$$

Le supplément de réorganisation est ainsi supérieur au supplément de minéralisation.

Enfin, en ce qui concerne les quantités d'azote disponible, azote indiqué comme entraîné, les variations de teneurs en azote minéral étant différentes, le fumier seul aurait donné 227 kg d'azote minéral, soit 21 kg de moins que le témoin, tandis que le fumier, avec fumure minérale l'année précédente, aurait donné 263 kg, soit 15 kg de plus que ce témoin.

Mais l'action très importante du fumier, bien qu'en deuxième année, sur la réorganisation permettrait d'expliquer l'influence bénéfique, sur les cultures, d'un supplément de fumure azotée minérale après un apport organique. On a coutume en effet de n'envisager l'action des fumures organiques que sous l'angle d'un supplément de minéralisation, alors que l'action inverse, sur la réorganisation est également favorisée par l'augmentation même du support organique et de la vie microbienne du milieu. La balance de ces deux actions opposées, peut être négative et dans ce cas la quantité d'azote disponible est plus faible en présence de fumier qu'en son absence.

2. — INFLUENCE D'UNE FUMURE MINÉRALE L'ANNÉE DE SON APPORT.

Pour cela nous devons comparer les traitements F_B et F_{Bb}. En ce qui concerne les calculs préliminaires, servant à élaborer le tableau, l'apport d'engrais minéral a été, dans une certaine mesure, ignoré. Si

cet apport se traduit par un enrichissement de la teneur en azote minéral, il sera compté comme une minéralisation, et s'il augmente la teneur en azote minéralisable, ce sera une réorganisation. Cette façon de faire permet de voir comment se comporte l'azote apporté.

Or nous notons :

Préminéralisation	187 — 175 =	12 kg
Minéralisation	405 — 365 =	40 »
Réorganisation	233 — 156 =	77 »
Entraînement	223 — 263 =	− 40 »

Les 70 kg d'azote apportés se retrouvent intégralement dans le supplément de réorganisation. Tout se passe, donc, comme si l'azote fourni avait été entièrement réorganisé, alors que, toutefois, son effet direct peut être observé dans les 40 kg comptés en plus dans la minéralisation.

Cette action sur la réorganisation s'explique par le fait que l'apport externe rompt l'équilibre biologique et favorise le phénomène susceptible de le rétablir (réorganisation ou entraînement).

La réorganisation ayant joué, le lessivage en a même été diminué.

Nous avons vu précédemment que la quantité d'azote entraîné était liée à la minéralisation et à la réorganisation, par la relation suivante :

$$E = \mu - R - \Delta m$$

Dans la cas F_B, nous avons :

$$E = 365 - 156 + 54 = 263$$

Dans le cas F_{Bb}, elle devient :

$$E = 405 - 233 + 51 = 233.$$

En dehors de son effet direct, cette action de la fumure minérale, par laquelle la réorganisation est augmentée, ainsi que la minéralisation, en diminuant les pertes par entraînement, donc l'azote considéré comme disponible, devrait permettre d'expliquer des cas de non efficacité des engrais azotés, et, comme nous le verrons par la suite, des effets importants d'arrière-action.

b) **Comparaison en 1957**.

Les bilans de 1957 s'établissent comme suit : (voir graphique p. 147).

Aucun apport d'azote minéral n'ayant été réalisé en 57, les parcelles ne sont différenciées que par leur traitement antérieur, soit fumier en 55, fumure azotée minérale en 55 et 56.

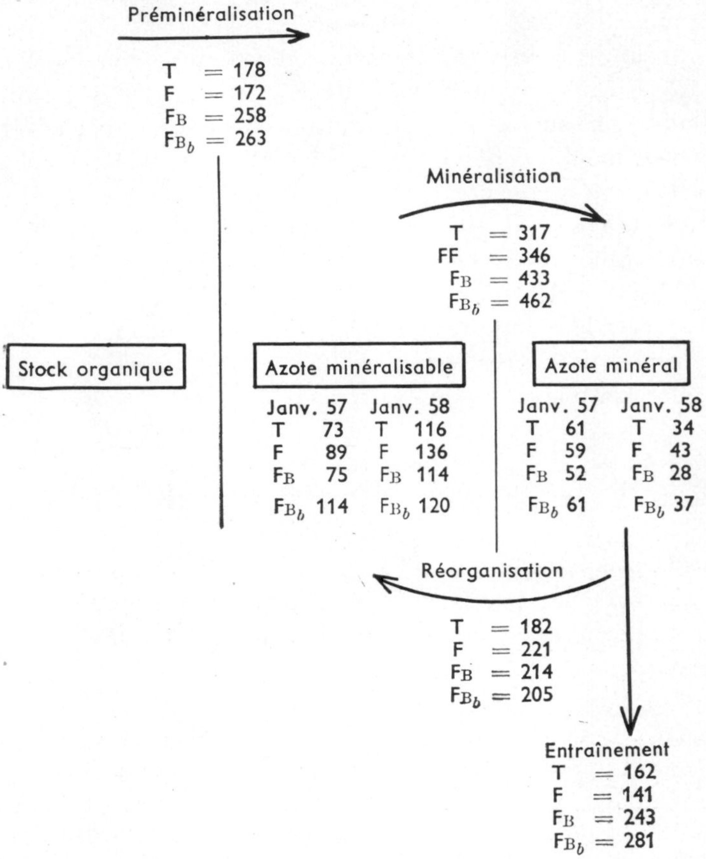
1. — Fumier.

Les chiffres, pour le fumier seul et pour le fumier ayant reçu des fumures azotées minérales, sont ici dissemblables et il est nécessaire de les traiter séparément.

Pour sa troisième année d'action, le fumier a entraîné les modifications suivantes :

	F T
Préminéralisation	172 — 178 = − 6
Minéralisation	346 — 317 = 29
Réorganisation	221 — 182 = 39
Entraînement	141 — 162 = − 21

On note peu d'effet sur l'usure des réserves, et une action très diminuée sur la minéralisation et la réorganisation.



2 — FUMIER + FUMURE MINÉRALE (150 N), deux ans auparavant.

La comparaison avec le fumier seul n'avait pas permis de noter d'arrière-action de la fumure minérale sur la minéralisation et la réorganisation en 1956.

Aussi, avons-nous été surpris de voir en 1957, pour ces mêmes types de parcelles, des différences importantes dans les quantités préminéralisées et entraînées.

Il faut en chercher l'explication dans l'épuisement très net de l'influence du fumier dans son action récupératrice... la réorganisation. Il est même remarquable de voir que cette action est d'autant plus faible qu'elle a pu s'exercer auparavant, grâce à des fumures azotées, apportées du dehors. La réorganisation beaucoup plus différenciée en 1956, a, en quelque sorte, préservé la Préminéralisation, relativement peu influencée par le traitement, jusque-là. L'apport organique, stabilisé par la réorganisation qu'il a suscité, semble fournir seulement son effet direct, le plus fréquemment envisagé, augmentation de la préminéralisation et de la minéralisation. Et, on aperçoit en 1957, troisième année après l'apport du fumier, l'effet très important des fumures minérales fournies en 55 et 56. En 1956, la préminéralisation et les quantités d'azote minéral disponibles (mesurées par les quantités entraînées) avaient été relativement peu modifiées alors que la minéralisation et la réorganisation étaient nettement augmentées. En 1957, comme nous l'avons déjà noté, la réorganisation est relativement constante.

Mais les fumures minérales, qui ont permis de rétablir plus rapidement l'équilibre déplacé par la fumure organique, permettent également d'observer la manifestation de l'enrichissement, qu'elles ont déterminé en combinaison avec le fumier.

En effet, on relève :

	$F_B - T$	$F_B - F$
Réorganisation	214 — 182 = + 32	214 — 221 = − 7
Préminéralisation	258 — 178 = + 80	258 — 172 = + 86
Minéralisation	433 — 317 = + 116	433 — 346 = + 87
Entraînement	243 — 162 = + 81	243 — 141 = + 102

Dans la comparaison F_B — T on note encore une légère action sur la réorganisation, mais l'augmentation de la préminéralisation se retrouve dans l'azote entraîné et, après correction de la réorganisation, dans la minéralisation.

Dans la comparaison F_B — F, le supplément de préminéralisation se retrouve dans la minéralisation et le lessivage.

Le second apport de fumure minérale, de 70 kg en 56, se traduit en 1957, pour F_{Bb}, par une diminution encore plus prononcée de l'effet de la fumure organique sur la réorganisation, et une légère augmentation des trois autres phénomènes, préminéralisation, minéralisation, lessivage.

L'ensemble de ces observations permet de tirer les conclusions suivantes :

— Dans un système stable, pour une usure des réserves à peu près constante, d'une année à l'autre, la quantité d'azote utilisable (ou perdu) peut être très variable.

— L'apport seul d'un fumier (relativement pauvre en azote) a déterminé, en deuxième année, une augmentation très nette des phéno-

mènes de minéralisation, compensée par une action inverse sur la réorganisation. Dans ces conditions, la quantité d'azote disponible ainsi que l'usure des réserves ont été peu modifiées, mais plutôt diminuées. Il en est de même, mais d'une façon moins marquée, en troisième année.

— Le complément minéral d'azote fourni par les engrais a, en deuxième année, augmenté encore les phénomènes observés avec le fumier seul. Mais ce complément a permis de rétablir plus rapidement l'équilibre perturbé par l'apport organique, puisque en troisième année, les parcelles avec fumier et fumure minérale ont donné une mobilisation plus importante des réserves et des quantités d'azote utilisables nettement supérieures.

— Un apport de matières organiques peut, suivant sa nature, économiser ou augmenter la consommation des réserves, diminuer ou augmenter la quantité d'azote minéral disponible.

DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

A la suite de ces résultats globaux, obtenus sur l'influence des traitements organiques et minéraux, nous voulions essayer de relier la manifestation des phénomènes individuels — préminéralisation, minéralisation, réorganisation — à des modifications extérieures des conditions climatiques, considérées comme agents de transformation des conditions de milieu favorisant, ou non, l'un des phénomènes.

La distribution mensuelle des productions individuelles des différents phénomènes, dont nous avons, jusqu'à présent, examiné les bilans annuels, est reportée pour les différents traitements dans les tableaux II — III — IV — V. Nous avons, par ailleurs, déjà présenté le tableau résumant les conditions climatiques.

Pour mettre en évidence une corrélation entre les phénomènes observés et les conditions extérieures, il aurait été nécessaire de pouvoir donner des caractéristiques de chacun de ces facteurs. L'étude des données climatiques du nord de la France, portant sur plus de 20 ans, n'a pas permis d'obtenir de façon précise des caractéristiques stables. Les variations saisonnières de température peuvent facilement être décalées d'un mois. Quant aux pluies, elles sont suffisamment variables pour que des moyennes décennales fassent apparaître une constance mensuelle de précipitations ne reflétant en rien la réalité. On ne peut, donc, obtenir des combinaisons précises de températures et de pluies, assez durables ou reproductibles, pour essayer de leur rattacher une manifestation saisonnière de l'évolution du métabolisme azoté.

Cependant, un examen attentif de nos résultats, semble montrer une relation entre l'usure des réserves (préminéralisation) et les pertes

par entraînement. Les chiffres indiquent en effet que la préminéralisation, importante en avril et mai, se prolonge dans la période hivernale. Or le tableau II permet de voir qu'après une forte préminéralisation, il faut attendre que les pertes par lessivage soient suffisantes pour que le phénomène se manifeste à nouveau. Les figures 1 et 2, représentant les

TABLEAU II

Distribution et valeurs mensuelles (kg/ha) des divers phénomènes accompagnant la minéralisation de l'azote

Parcelles — Témoin

T	Préminéralisation	Minéralisation totale	Minéral présent	Réorganisation	Lessivage
1956 12-1			85		
	—	33		1	40
12-3			77		
	—	18		2	3
9-4			90		
	65	46		—	—
11-5			136		
	12	—		16	—
11-6			120		
	—	46		5	16
10-7			145		
	—	44		15	42
9-3			132		
	—	30		4	44
13-9			114		
	17	—		25	2
12-10			87		
	48	23		11	—
14-11			99		
	6	40		3	74
10-12			62		
	21	32		6	27
1957 15-1	*169*	*312*	61	*88*	*248*
	27	9		21	—
1957 27-2			49		
	—	58		20	—
1-4			87		
	119	—		7	—
2-5			80		
	—	127		—	66
1-6			141		
	—	8		40	9
30-6			100		
	2	12		43	—
26-7			69		
	—	57		11	35
30-8			80		
	30	3		23	—
4-10			60		
	—	14		2	11
12-12			61		
	—	29		15	41
1958 30-1	*178*	*317*	34	*182*	*162*

quantités cumulées d'azote préminéralisé et drainé d'une part, par le témoin, et d'autre part par les parcelles ayant eu le plus de traitements EBb, montrent enfin clairement que la préminéralisation n'entre effectivement en jeu que lorsque les pertes par lessivage dépassent la quantité d'azote préminéralisé antérieurement.

Tableau III

Distribution et valeurs mensuelles (en kg/ha) des divers phénomènes accompagnant la minéralisation de l'azote

Parcelles — Fumier

F	Préminéralisation	Minéralisation totale	Minéral présent	Réorganisation	Lessivage
1956 12-1			85		
	—	38		—	44
12-3			79		
	—	20		—	3
9-4			96		
	68	35		—	—
11-5			131		
	—	13		15	18
11-6			111		
	9	52		8	—
10-7			155		
	—	56		8	54
9-8			149		
	—	63		11	63
13-9			138		
	21	—		59	—
12-10			79		
	30	16		11	—
14-11			84		
	—	74		2	45
10-12			111		
	2	—		52	—
1957 15-1			59		
	130	*367*		*166*	*227*
	18	31		2	1
1957 27-2			87		
	—	24		10	7
1-4			94		
	114	6		15	—
2-5			85		
	12	87		29	3
1-6			140		
	—	46		44	33
30-6			109		
	—	24		17	25
26-7			91		
	—	47		20	19
30-8			99		
	15	6		25	—
4-10			80		
	—	30		28	7
12-12			75		
	13	45		31	46
1958 30-1			43		
	172	*346*		*221*	*141*

Si l'on reprend l'ensemble du phénomène de la minéralisation suivant le schéma,

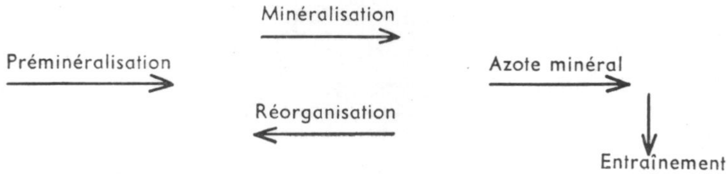


TABLEAU IV

Distribution et valeurs mensuelles (en kg/ha) des divers phénomènes accompagnant la minéralisation de l'azote

Parcelles — Fumier avec fumure minérale en 55

F_B	Préminéralisation	Minéralisation totale	Minéral présent	Réorganisation	Lessivage
1956 12-1			106		
	—	13		25	4
12-3			90		
	7	23		17	20
9-4			76		
	86	68		—	3
11-5			141		
	—	39		40	37
11-6			103		
	32	84		—	—
10-7			187		
	—	47		2	62
9-8			170		
	—	19		—	69
13-9			120		
	37	6		33	—
12-10			93		
	13	7		17	—
14-11			83		
	—	28		14	11
10-12			86		
	—	31		8	57
1957 15-1			52		
	175	*365*		*156*	*263*
	43	16		17	1
1957 27-2			50		
	—	71		2	39
1-4			80		
	132	10		23	—
2-5			67		
	12	113		8	—
1-6			172		
	—	42		46	23
30-6			145		
	—	11		13	69
26-7			74		
	—	36		25	28
30-8			57		
	71	24		3	2
4-10			76		
	—	42		77	18
12-12			23		
	—	68		—	63
1958 10-1			28		
	258	*433*		*214*	*243*

il est compréhensible que ce phénomène biologique, aboutissant normalement à un équilibre, ne puisse évoluer que par rupture d'un des points de l'équilibre, qui ne peut être, dans notre étude de sols nus, que la perte d'azote par entraînement.

On obtient ainsi le principe que la préminéralisation ou évolution des réserves, est déterminée par l'élimination de l'azote minéral du

TABLEAU V

Distribution et valeurs mensuelles (en kg/ha) des divers phénomènes accompagnant la minéralisation de l'azote

Parcelles — Fumier avec fumure minérale en 55 et 56

F_{B_b}	Préminéralisation	Minéralisation totale	Minéral présent	Réorganisation	Lessivage
1956 12-1			112		
	—	10		14	24
12-3			84		
	55	44		2	—
9-4			126		
	52	33		—	1
11-5			158		
	—	36		17	45
11-6			132		
	11	85		—	—
10-7			217		
	—	1		31	30
9-8			157		
	—	62		13	83
13-9			123		
	32	2		31	1
12-10			93		
	37	39		31	1
14-11			100		
	—	54		23	37
10-12			94		
	—	39		71	1
1957 15-1			61		
	187	*405*		*233*	*223*
	28	48		—	—
1957 27-2			109		
	—	78		54	58
1-4			75		
	158	8		8	—
2-5			75		
	—	113		16	24
1-6			148		
	—	50		44	27
30-6			127		
	—	17		15	36
26-7			93		
	—	21		—	44
30-8			70		
	77	8		24	—
4-10			54		
	—	75		—	38
12-12			91		
	—	44		44	54
1958 30-1			37		
	263	*462*		*205*	*281*

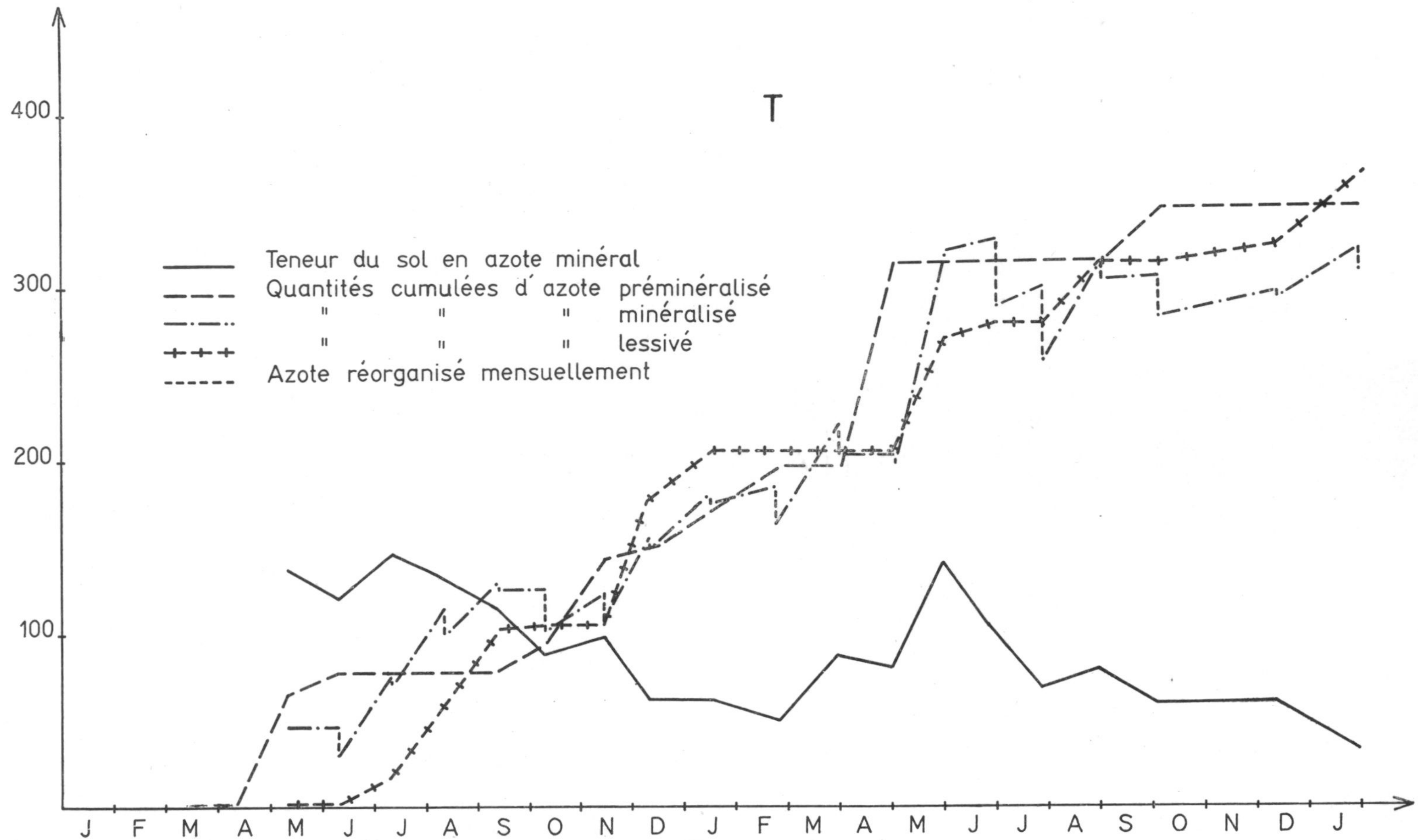
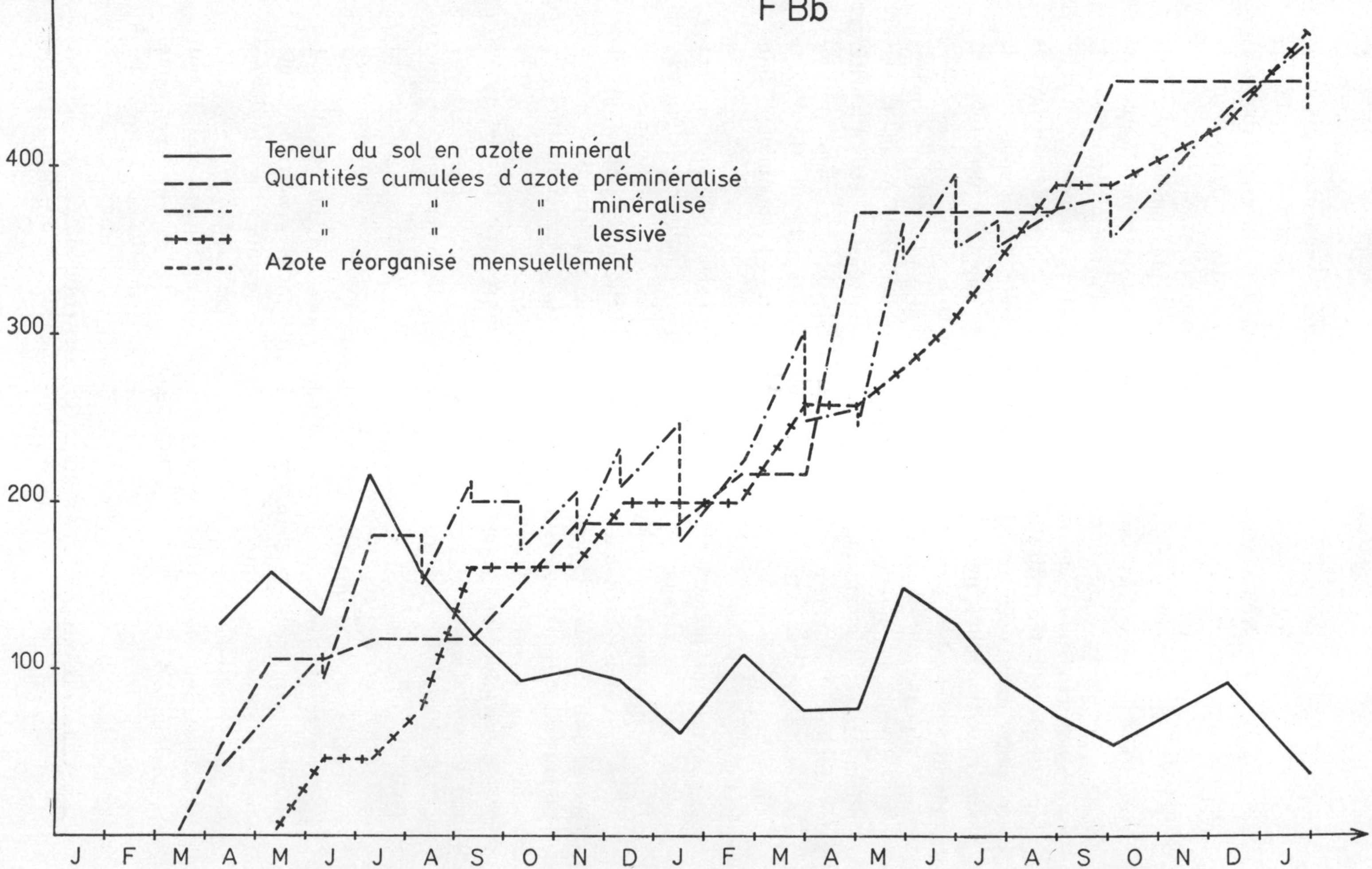

T
400
300
200
100
Teneur du sol en azote minéral
Quantités cumulées d'azote préminéralisé
" " " minéralisé
" " " lessivé
Azote réorganisé mensuellement
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J

FIG. 1

FIG. 2


F Bb
Teneur du sol en azote minéral
Quantités cumulées d'azote préminéralisé
" " " minéralisé
" " " lessivé
Azote réorganisé mensuellement
500
400
300
200
100
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J

milieu. Ceci ne contredit pas notre observation précédente, suivant laquelle les pertes par entraînement n'indiquaient pas la quantité d'azote organique ayant évolué, mais au contraire l'explique. Le graphique montre en effet, qu'à un instant donné, la différence entre ces deux quantités peut être importante en plus ou en moins.

La minéralisation semble, par ailleurs, être plus influencée par la proximité de la reconstitution des réserves d'azote minéralisable que par la température ambiante. Lorsque le stock d'azote minéralisable est, après minéralisation, consommé par les pertes, la minéralisation s'arrête, en attendant la reconstitution des réserves. C'est ainsi que nous avions cru noter, dans notre premier mémoire, un cycle de trois mois pour la minéralisation, alors que ce fait devait être lié à une coïncidence, faisant que l'épuisement se produisait également en trois mois.

On peut enfin signaler que la réorganisation semble être plus importante lorsque la minéralisation a épuisé le stock d'azote préalablement préminéralisé. La minéralisation peut même dépasser cette quantité, en diminuant la masse totale d'azote minéralisable, de même que les pertes et la réorganisation peuvent consommer plus que la quantité d'azote minéralisé antérieurement, en abaissant le niveau de l'azote minéral dans le sol.

Après une préminéralisation importante, l'azote est donc minéralisé d'une façon plus ou moins rapide suivant les conditions extérieures. Dans la mesure où les pertes ou consommations sont insuffisantes, cet azote s'accumule et donne alors lieu à des phénomènes importants de réorganisation. Mais lorsque les pertes dépassent la quantité d'azote préminéralisé — et minéralisé entre temps — la préminéralisation joue à nouveau et permet un nouveau cycle.

L'ensemble de ce cycle est réglé, dans notre essai, par les pertes par lessivage.

Or l'importance de ces dernières est sous la dépendance de deux facteurs :

1° Quantité et répartition des pluies.

2° Présence et quantité d'azote minéral.

En ce qui concerne le premier point, nous n'avons pas assez de données pour prédire à coup sur, suivant les autres conditions climatiques (vent, température, état hygrométrique), qu'une quantité donnée de pluie peut entraîner un lessivage.

Pour que, ensuite, les pertes en azote soient importantes, il faut que la pluie lessivante se situe à un moment où le sol est enrichi en azote. De plus la réorganisation peut soustraire une partie de cet azote au lessivage.

Cela nécessite des observations précises et détaillées, car actuellement on peut dire que, sur des chiffres annuels par exemple, il n'y a pas

plus de relation entre la quantité d'eau tombée et la quantité d'eau drainée, qu'entre cette dernière et la quantité d'azote minéral entraîné.

Ainsi, les chiffres tirés du mémoire de BASTISSE [1] indiquent pour les cases lysimétriques de Versailles :

	Pluies mm	Eau drainée mm	N entraîné kg/ha
1932	512,3	200,2	160
1934	668,4	261,2	265
1935	726,9	303,4	107
1940	709,5	214,9	76

Cet ensemble de considérations ne nous permet pas enfin d'attribuer une grande signification à la teneur instantanée d'un sol en azote minéral.

Les courbes de variations de ces teneurs sont représentées sur les graphiques 1 et 2.

Elles permettent d'illustrer ce fait évident, que la teneur d'un sol non cultivé, à un moment donné, est le résultat du bilan de l'azote formé par minéralisation, diminué de l'azote entraîné par les pluies ou utilisé par la réorganisation.

Une accumulation d'azote signifie, naturellement, que les processus de formation l'emportent sur ceux d'utilisation ou de pertes. Mais à l'inverse, une diminution d'azote ne signifie pas, forcément, qu'il n'y a pas eu d'azote minéralisé, mais simplement que la quantité utilisée a été plus forte que celle formée.

Si l'on considère, par exemple, le bilan des différentes phases de la minéralisation, entre les mois de novembre et décembre 1956, on obtient les chiffres suivants :

Pour les témoins, pour lesquels l'azote minéral formé est, à cette époque, à peu près égal à l'azote préalablement préminéralisé :

Azote minéral en novembre	99
» minéralisé	+ 40
» réorganisé	— 3
Azote théoriquement	
» disponible	136
» entraîné (libre)	— 74
Azote minéral en décembre	62

soit une diminution de la teneur du sol en azote minéral de 37 kg pour une quantité utilisable de 74.

Pour les parcelles F_{B_b}, pour lesquelles l'azote minéral formé dépasse à ce moment l'azote préalablement préminéralisé : conditions favorables à la réorganisation.

[1] BASTISSE. — Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie. *Annales Agronomiques*, 1953.

Azote minéral en novembre très comparable aux parcelles précédentes 100
Azote minéralisé.............. + 54
» réorganisé — 23

Azote théoriquement
» disponible 131
» entraîné (libre) — 37

Azote minéral en décembre 94

Ici la diminution de la teneur du sol est de 6 kg pour une quantité utilisable de 37.

Le mois suivant, entre décembre et janvier, on observe :

Témoin :

Azote minéral en décembre 62
» minéralisé 32
» réorganisé — 6

Azote théoriquement
» disponible 88
» entrainé (libre) — 27

Azote minéral en janvier 61

pas de modification de la richesse du sol pour une quantité utilisable de 27 kg.

Parcelles F_{Bb} ;

Azote minéral en décembre 94
» minéralisé 39
» réorganisé — 71

Azote théoriquement
» disponible.............. 62
» entraîné................ — 1

Azote minéral en janvier...... 61

Ici on observe une diminution de la teneur du sol en azote minéral, sans qu'il y ait eu d'azote utilisable et cette diminution peut traduire, en fait, un véritable manque d'azote disponible, puisque la réorganisation a consommé beaucoup plus qu'il n'a été minéralisé.

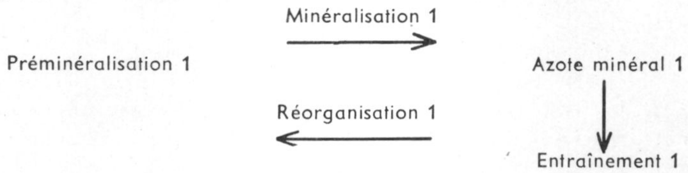
Ceci confirme pourquoi nous avons considéré comme azote utilisable celui qui était effectivement entraîné.

Peut-on en tirer des indications pour les sols cultivés?

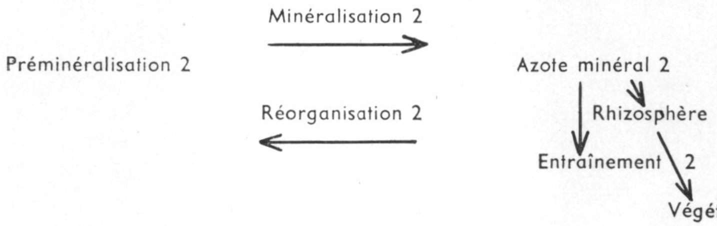
Cette étude nous semble avoir montré la complexité des phénomènes mis en jeu, dans le cas, relativement simple, des sols nus. Bien que nous n'ayons pu encore étudier sérieusement le problème de l'influence d'une

culture sur ces mécanismes, nous ne pensons pas qu'il soit possible d'extrapoler les résultats, en déduisant simplement l'azote prélevé par les cultures.

Au système.



il nous paraît nécessaire de substituer le système :



L'accroissement ou la modification de la population microbienne occasionné par le milieu spécial que représente la rhizosphère, entraîne vraisemblablement un blocage temporaire de l'azote minéral dans un phénomène voisin de la réorganisation. L'équilibre de la minéralisation en devient alors entièrement perturbé et il est plus que probable que les phénomènes précédents de préminéralisation, minéralisation et réorganisation deviennent différents.

Ce schéma permettrait d'expliquer l'influence profonde, en plus de celles que nous avons déjà signalées, d'une fumure azotée minérale, extérieure, même faible. Elle vient en effet s'insérer au milieu du nouvel équilibre, en modifiant la valeur de la grandeur azote minéral 2.

Il nous semble ainsi que l'on ne peut comparer les deux systèmes. Dans ce sens, il faut aussi noter qu'il serait nécessaire d'envisager l'influence séparée des grandes espèces de végétaux cultivés. La présente étude, cependant, nous a permis de mettre en évidence la complexité des mécanismes mis en jeu, et pourra servir de base de recherches pour des travaux ultérieurs.

RÉSUMÉ

Le comportement de parcelles, différemment traitées par des fumures organiques et minérales, a été soumis à la méthode de calcul, présentée antérieurement, permettant de chiffrer l'amplitude des différentes phases de l'évolution de l'azote dans le sol (préminéralisation ou usure des réserves, minéralisation, réorganisation et lessivage). Il en est ressorti les points suivants :

a) La fraction des réserves organiques (azote minéralisable) à partir de laquelle se forme l'azote minéral peut être alimentée, d'une part, par une dégra-

dation lente du stock organique total et, d'autre part par une réorganisation de l'azote minéral précédemment formé ou fourni de l'extérieur. La réorganisation réalise, pour ce phénomène, un cycle court, économisant l'azote minéral et le mettant en quelque sorte plusieurs fois à la disposition des plantes.

b) En l'absence d'utilisation, l'accumulation d'azote minéral favorise la réorganisation.

c) L'ensemble du phénomène général, mettant en jeu les réserves organiques, semble être régi par les pertes — c'est-à-dire dans le cas de nos observations par le lessivage. D'après ces résultats la végétation en tant que consommatrice d'azote minéral, pourrait avoir une action directe sur l'évolution des réserves azotées.

d) Les cas observés ont montré nettement l'action d'un fumier. Son effet positif sur la minéralisation est largement compensé, même en deuxième année, par un effet inverse sur la réorganisation, si bien que la quantité d'azote minéral utilisable peut en être diminuée.

e) La fumure azotée minérale, ajoutée à la fumure organique, a permis, en étant entièrement bloquée, d'accélérer l'action du fumier sur la réorganisation et d'obtenir d'une façon plus manifeste en troisième année une augmentation de la quantité d'azote disponible.

SUMMARY

Considerations on the mineralization and utilization of the nitrogen reserves in soil.

Data of field plots, treated variously with farmyard manure and mineral nitrogen fertilizer, were subjected to a previously described method of calculation, yielding values on the range of the different phases of nitrogen evolution in the soil (premineralization or exhaustion of reserves, mineralization, reorganisation and leaching).

Results led to the following conclusions :

a) The part of organic reserves (" mineralisable " nitrogen), from which mineral nitrogen is formed, is alimented either by a slow decomposition of the total reserves of organic matter, or by reorganisation of the previously formed or brought mineral nitrogen. Nitrogen reorganisation realise, for this processus, a short cycle, sparing the mineral nitrogen and making it repeatedly available to plants.

b) In absence of utilization, the accumulation of mineral nitrogen promotes its reorganisation.

c) The overall process, affecting the organic reserves, is controlled by leaching losses ; vegetation utilizing the mineral nitrogen could exert a direct action on the evolution of nitrogen reserves.

d) Observations showed that the positive effects of farmyard manure on mineralization can be counteracted, even in the second year after application, by its negative effect on nitrogen reorganisation, so that the amount of available mineral-nitrogen may even decrease.

e) Addition of mineral-nitrogen fertilizer to the organic manure accelerates the effect of manure on nitrogen reorganisation and results in a marhed increase in available nitrogen in the third year.

Взгляд на минерализацию и на использование запасов азота почвы.

Ж. ЛЕФЭВР и Ж. ХИРУ (Амьен).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Поведение площадок, получивших различные органические и минеральные удобрения, было подвергнуто методу подсчета, ранее представленному и позволяющему выразить в цыфрах амплитуду различных фаз эволюции азота в почве (преминерализация или истощение запасов, минерализация, реорганизация (= возвращение в органическую форму) и вымывание). Получены следующие заключения :

a. Фракция органических запасов (азот могущий быть минерализованным), из которой образуется минеральный азот, может получать питание, с одной стороны, медленным уменьшением общего органического запаса и, с другой стороны, реорганизацией минерального азота, ранее образовавшегося или данного извне. Реорганизация осуществляет, в этом явлении, короткий цикл, экономя минеральный азот и давая его, некоторым образом много раз, в распоряжение растений.

b. В отсутствии использования азота растениями, скопление минерального азота способствует реорганизации.

c. Результирующая общего явления, касающегося органических запасов, повидимому сводится к потерям, то-есть, в случае наших наблюдений, к вымыванию. Согласно этим результатам, растительность, являясь потребительницей минерального азота, могла бы иметь прямое действие на эволюцию запасов азота.

d. Изученные случаи позволили ясно видеть действие навоза. Его положительное действие на минерализацию широко уравновешено, даже в течение второго года, его противоположным действием на реорганизацию, так что доступное количество минерального азота может быть даже уменьшено.

e. Минеральное азотное удобрение, прибавленное к органическому, позволило, будучи полностью блокированным, ускорить действие навоза на реорганизацию и получить на третий год более ясно увеличение количества усвояемого азота.

ZUSAMMENFASSUNG

Betrachtungen zur Mineralisierung und Verwendung der Stickstoffreserven des Bodens.

Gemäss einer früher angeführten Berechnungsmethode, die es erlaubt den Umfang der verschiedenen Phasen der Bodenstickstoffentwicklung einzuschätzen (Vormineralisierung oder Abnutzung der Reserven, Mineralisierung, Neugestaltung und Auswaschung), wurde das Verhalten von Parzellen untersucht, welche verschiedenartige organische und mineralische Düngungen erhielten. Es ergaben sich folgende Punkte :

a) Der Anteil der organischen Reserven (mineralisierbarer Stickstoff) aus welchem sich der mineralische Stickstoff bildet, kann durch eine langsame Degradierung des organischen Gesamtbestandes einerseits, durch eine Neugestaltung des vorhergehend gebildeten oder von aussen zugebrachten Mineralstickstoffes andererseits, gespeist werden. Bei dieser Erscheinung verwircklicht die Neugestaltung einen kurzen Kreislauf, indem sie zu einer Zurücklegung des

Mineralstickstoffes führt und so denselben, in wiederholter Weise, zur Verfügung der Pflanzen stellt.

b) In Abwesenheit einer Verwendung, wird die Neugestaltung durch die stattfindende Anhäufung von mineralem Stickstoff, begünstigt.

c) Die Verluste — d. h. im Falle unserer Beobachtungen, die Auswaschungen — scheinen das Gesamtbild dieser allgemeinen Erscheinungen zu bestimmen, welche zu einer Einsetzung der organischen Reserven führen. Nach diesen Ergebnissen, könnte die Vegetation als Mineralstickstoffkonsument eine direkte Auswirkung auf die Entwicklung der Stickstoffreserven zeitigen.

d) Die beobachteten Fälle zeigten mit Deutlichkeit die Wirkung eines Stallmistes. Durch seinen entgegengesetzten Einfluss auf die Umgestaltung ist seine positive Wirkung auf die Mineralisierung, selbst im zweiten Jahre, weitgehend ausgeglichen, so dass die zur Verfügung stehende Mineralstickstoffmenge vermindert sein kann.

e) Die der organischen Düngung zugesetzten mineralische Stickstoffdüngung erlaubte, indem sie gänzlich blockiert war, die Stallmisteinwirkung auf die Umgestaltung zu beschleunigen ; hiermit wurde, im dritten Jahre, eine offenbare Zunahme der zur Verfügung stehenden Stickstoffmengen erreicht.

631. 416. 4 : 631. 432. 3 : 631. 414 : 2.

INFLUENCE DE LA NATURE DES ARGILES SUR LA DYNAMIQUE DU POTASSIUM DANS LES SOLS DE QUELQUES CHAMPS D'ESSAIS

PAR

J. J. FRANC de FERRIÈRE, R. BLANCHET, G. MILLOT et Th. CAMEZ

Société commerciale des Potasses d'Alsace, Mulhouse.
Station Agronomique, Châteauroux.
Faculté des Sciences, Strasbourg.

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

I. — Phénomènes d'adsorption des ions K^+ et nature des argiles.
- Techniques expérimentales.
- Résultats.
- Conclusions.

II. — Nature des argiles et enrichissement des sols par les engrais.

III. — Nature des argiles et réaction des cultures aux engrais potassiques.

IV. — Conclusions.

INTRODUCTION

Les diverses argiles possèdent à l'égard du potassium des propriétés très différentes, d'une part quant à leur richesse initiale en ions K^+, d'autre part quant à leur faculté de rétention des ions apportés par les engrais. Ainsi, les argiles de type micacé (illites) renferment dans leurs réseaux des quantités considérables de potassium, qui peuvent être libérées peu à peu lorsque les feuillets s'écartent. Les autres types (kaolinite, chlorite) ne présentent pas cette teneur élevée en K.

Par ailleurs, l'étendue des sufraces adsorbantes et la capacité d'échange de cations relatives à un poids donné d'argile sont très différentes selon les types, les deux cas extrêmes étant la kaolinite (faible surface et faible capacité d'échange) et la montmorillonite (grande surface, capacité d'échange élevée). Ces propriétés influent fortement sur la dynamique du potassium.

On rencontre généralement dans les sols des mélanges des divers types d'argiles, parmi lesquels l'un ou l'autre peut être prédominant. Nous rapportons ici divers résultats concernant les phénomènes d'adsorption et la réaction des cultures aux engrais potassiques, d'après les données obtenues sur les sols de divers champs d'essais renfermant des proportions variables des diverses familles d'argiles.

I. — PHÉNOMÈNES D'ADSORPTION DES IONS K^+ ET NATURE DES ARGILES

1° Techniques expérimentales.

L'étude des phénomènes d'adsorption et de désorption des ions K^+ a été effectuée sur les sols d'un certain nombre de champs d'essais d'engrais potassiques de la Société Commerciale des Potasses d'Alsace. Certaines parcelles n'ont reçu, pendant plusieurs années, aucun engrais potassique (K_0), d'autres en ont reçu des quantités relativement importantes au cours des cultures expérimentales (K_2).

La désorption progressive des ions K^+ a été obtenue en plaçant au contact de poids constants de sols, des volumes croissants d'une solution d'acétates de Calcium et de Magnésium (1). Pour chaque traitement a été déterminée la teneur en K^+ des 2 phases liquide et solide :

— *Concentration d'équilibre en K^+*, exprimée en mg K par litre, dans la phase liquide, portée en ordonnées sur les graphiques 1 et 2 ci-dessous.

— *Teneur en K adsorbé*, restant après traitement dans la phase solide, c'est-à-dire dans le sol, exprimée en partie par million de sol (p.p.m. du sol), et portée en abscisses sur les mêmes graphiques. Cette teneur en K^+ adsorbé restant après traitement, soit r, représente la différence entre la teneur initiale en K^+ échangeable du sol, Q, et la quantité de K^+ extraite au cours du traitement considéré, q, soit $r = Q - q$.

Les essais ont porté sur les sols de douze champs d'essais. La nature minéralogique des argiles de ces sols a été étudiée à l'aide des rayons X. Le pourcentage des divers minéraux au sein de la fraction argileuse est apprécié d'après l'intensité des raies de diffraction, en comparant les sols examinés à des mélanges connus. Les résultats sont obtenus à 10 p. 100 près environ.

2° Résultats.

Le tableau I indique la nature des argiles de ces champs d'expériences. Ceux-ci ont été classés de la manière suivante :

a) *Les cinq premiers champs*, le Petit Bêle, St-Jean-du-Cardonnay, la Harpe, Pompignac, Pau St-Léon, comportent des argiles à dominante chloritique : soit 40 p. 100 d'illite et 60 p. 100 de chlorite, avec des teneurs

variées en quartz très fin. Seule de ces cinq argiles, celle du Petit Bêle contient une quanitté notable d'éléments interstratifiés.

b) *Les quatre champs suivants* : Woippy, Beaucouzé, Toulouse-Thibaut, Levet, contiennent des proportions d'illite croissantes de 50 à 80 p. 100. Ces illites sont caractérisées, sur leur diagramme aux rayons X, par la présence d'une raie à 10 Å extrêmement nette des deux côtés. Il semble que l'on puisse interpréter ce fait en disant que l'on est en présence d'argiles micacées peu altérées, les portions fines plus altérées ayant pu se trouver lessivées ou détruites par les phénomènes pédologiques. Le sol de Levet est particulièrement riche en quartz très fin, l'illite micacée dominant nettement dans l'argile vraie.

TABLEAU I

Composition minéralogique des argiles de divers champs d'essais d'engrais potassiques.

Champs d'essais	Teneur en argile % de terre fine	Proportions des différentes argiles (pour cent du mélange)					
		Illite	Interstratifiées	Chlorite	Montmorillonite	Kaolinite	Quartz trés fin
Le petie Bêle ...	14,5	40 %	présents	60 %	—	—	—
St-Jean du Gard.	10,2	40	—	60	—	—	assez ab.
La Harpe	10,5	40	—	60	—	—	abondant
Pompignac	12,3	40	—	60	—	—	assez ab.
Pau-St-Léon	21,3	40	—	60	—	—	assez ab.
Woippy........	5,8	50 (mica)	—	50	—	—	—
Beaucouzé......	12	60 (mica)	—	40	—	—	—
Toulouse-Thibaut.	17,3	80 (mica)	—	20	—	—	—
Levet	13,5	80 (mica)	—	—	—	20	très ab.
La Malmare	12	50	—	—	20	30	—
Ablis...........	17,5	60	présents	40	—	—	présent
Lieusaint.......	16,7	70	présents	10	—	20	présent

c) *La Malmare* est caractérisée par la présence de 20 p. 100 de montmorillonite en mélange avec 50 p. 100 d'illite et 30 p. 100 de kaolinite.

d) *Enfin Ablis et Lieusaint* comportent 60 à 70 p. 100 d'illite. Nous sommes ici en présence de sols de limon des plateaux de la région parisienne provenant de la décalcification de l'ergeron, c'est-à-dire d'un loess d'origine éolienne, suivie d'un lessivage partiel de l'argile de surface. Des phénomènes pédologiques d'altération paraissent avoir provoqué un certain baillement des fentes de ces illites, se traduisant dans les diagrammes de rayons X par une limite floue du flanc interne de la raie.

Nous avons groupé sur les graphiques I et II, dans l'ordre indiqué ci-dessus, les courbes de désorption des ions K^+ obtenues sur ces divers sols. A chaque champ se rapportent deux courbes : une courbe K_0 correspondant aux parcelles cultivées de longues années sans aucun apport

d'engrais potassiques, et une courbe K_2 correspondant au sol des parcelles cultivées avec apport régulier de doses renforcées d'engrais potassiques.

Les 2 extrémités de chacune des courbes représentent :

— l'une les teneurs en K maxima, résultant de l'application des quantités les plus faibles de liquide désorbant (conditions d'origine des échantillons de sol) ;

— l'autre aux teneurs en K minima observées, réprésentant un état d'épuisement intense en K^+ obtenu à l'aide d'une dilution très forte par le liquide désorbant.

La différence entre les chiffres maxima et minima observés donne une idée de la quantité totale de potasse libérable par désorption dans les parcelles K_0 et K_2, dans les conditions de l'expérience.

TABLEAU II

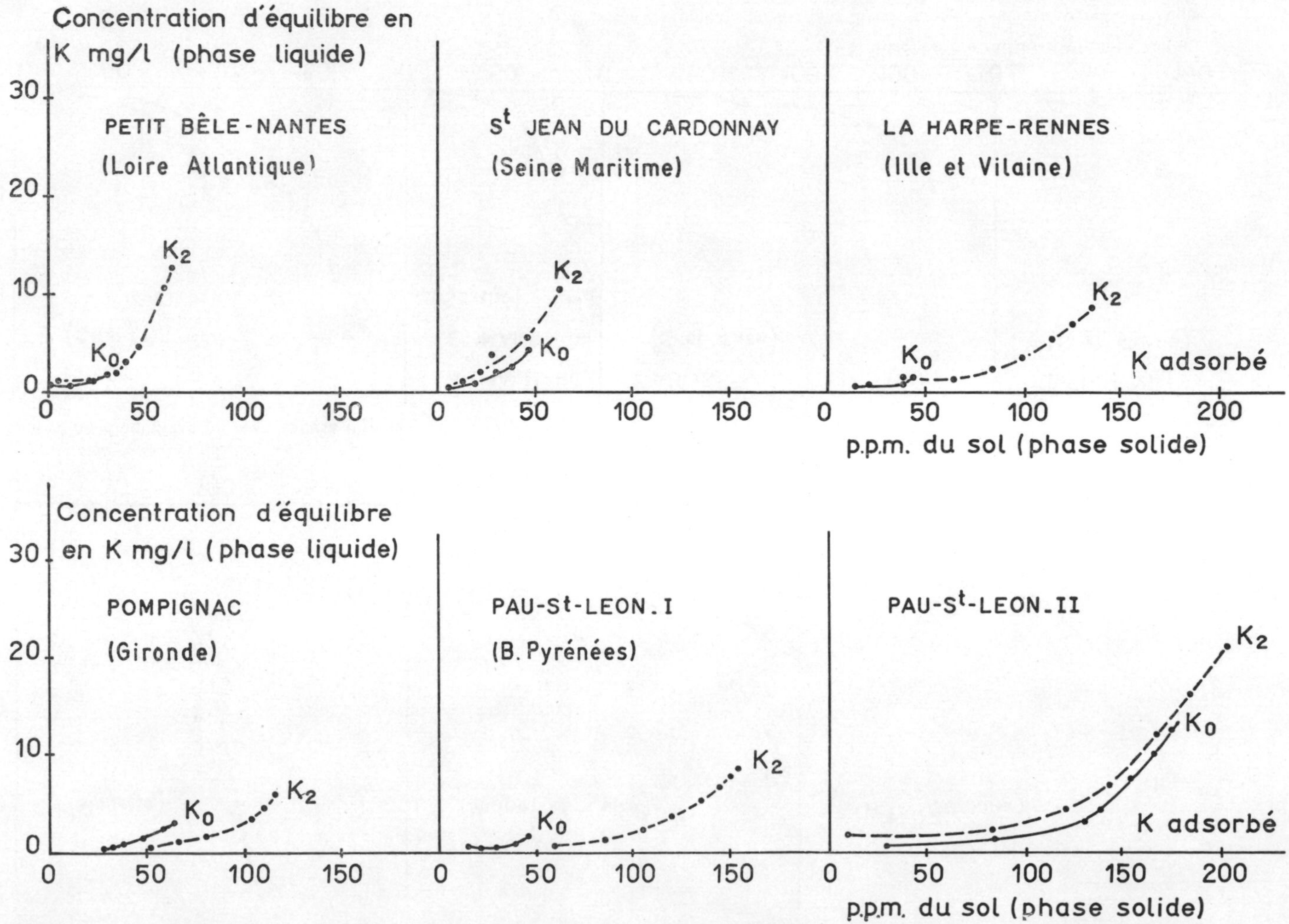
K adsorbé et concentration d'équilibre en K dans les divers sols.

Champs d'essais	K adsorbé p.p.m, du sol (phase solide)						Concentration d'équilibre en K mg/l (phase liquide)					
	K_0			K_2			K_0			K_2		
	Max.	min.	Diff. M−m	Max.	min.	Diff. M−m	Max.	min.	Diff. M−m	Max.	min.	Diff. M−m
Le Petit Bêle	29	1	28	61	6	55	1,4	0,2	1,2	7,4	0,5	6,9
St-Jean du Gard	47	5	42	62	8	54	4,3	0,5	3,8	10,7	0,4	10,3
La Harpe	45	15	30	137	38	99	1,6	0,4	1,2	9,1	1,0	8,1
Pompignac	64	28	36	113	52	61	2,8	0,3	2,5	6,2	0,6	5,6
Pau-St-Léon	43	16	27	152	72	80	1,6	0,2	1,4	8,7	0,7	8,0
Moyenne	*45*			*105*		*69*	*2,3*			*8,4*		*7,6*
Woippy	72	29	43	125	28	97	7,2	0,4	6,8	40,5	1,2	39,3
Beaucouzé	74	47	31	192	5	187	5,0	0	5,0	26,6	1,6	25,0
Toulouse-Thibaut	72	2	70	185	34	151	6,2	0,6	5,6	27,0	1,6	25,4
Levet	95	20	75	170	53	117	8,8	0,8	8,0	23,0	1,2	21,8
Moyenne	*78*			*168*		*138*	*6,8*			*29,3*		*27,8*
La Malmare	67	15	52	97	14	83	8,4	0,4	8,0	19,6	0,8	18,8
Ablis	78	38	50	160	97	63	1,8	0,3	1,5	7,8	1,5	6,3
Lieusaint	116	59	57	103	28	75	2,9	0,5	2,4	2.3	0,8	1,5

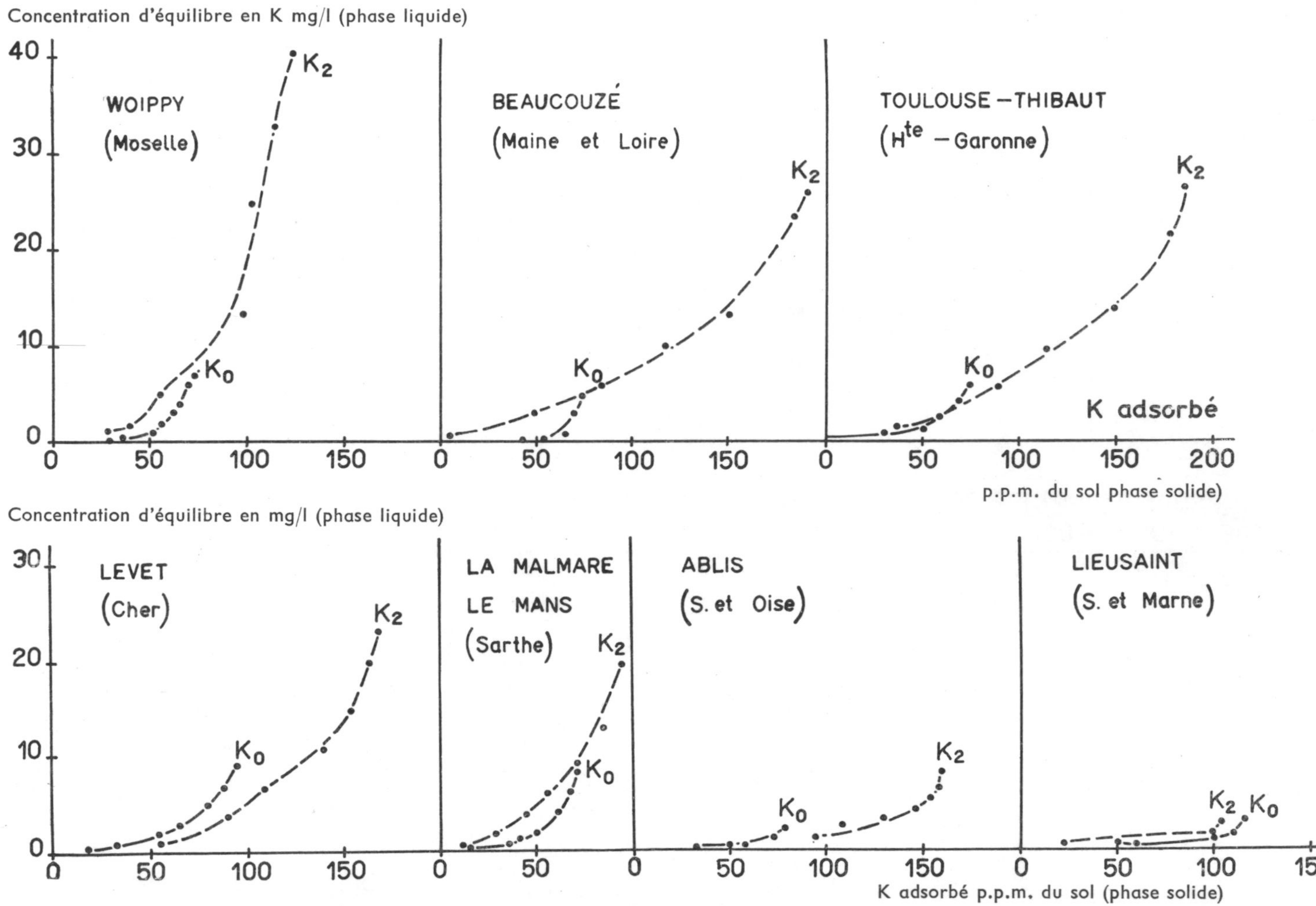
Le tableau II porte, pour chacun des sols, les maxima et minima de K adsorbé et de concentrations d'équilibre, ainsi que les différences entre ces maxima et minima.

Voyons comment se présentent ces courbes dans les différents sols, en fonction de la composition minéralogique des argiles.

a) Les *cinq premiers sols* figurant sur le graphique I (le Petit-Bêle,



GRAPHIQUE I. — Concentration d'équilibre en K mg/l et K adsorbé en p.p.m. du sol dans divers champs d'essais d'engrais potassiques.



GRAPHIQUE II. — Concentration d'équilibre en K mg/l et K adsorbé en p.p.m. du sol dans divers champs d'essais d'engrais potassiques.

St-Jean-du-Cardonnay, la Harpe, Pompignac, Pau-St-Léon) présentent une teneur dominante en chlorite (60 p. 100).

La pauvreté naturelle en Potasse de cette argile se traduit en K_0 par la faiblesse relative du K^+ adsorbé, qui ne dépasse pas 64 p. p. m. du sol, et par la faiblesse de la concentration d'équilibre qui ne dépasse pas 4,3 mg K/litre.

Le faible pouvoir de rétention de la chlorite vis-à-vis des ions K^+ apportés sous forme d'engrais semble amener un lessivage important de ces ions par les eaux d'infiltration. Cela se traduit par la dimension réduite des courbes K_2, correspondant à des différences maxima - minima ne dépassant pas 99 p. p. m. pour le K^+ adsorbé et 10,3 mg/l pour la concentration d'équilibre en K^+.

On peut remarquer qu'il a été tracé deux graphiques (4 courbes) pour les essais de Pau-St-Léon ; le second correspond à des apports dans certaines parcelles K_2 et K_0 de fumier de ferme représentant des quantités importantes d'ions K^+ d'origine organique. Ce sol est d'ailleurs très riche en humus (6,75 p. 1000 d'humus, méthode Chaminade). Dans les deux cas, les courbes K_0 et K_2 se superposent sensiblement dans leurs parties communes.

b) Les *quatre sols suivants* figurant sur le graphique II (Woippy, Beaucouzé, Toulouse-Thibaut, Levet) sont plus riches en illite que les précédents ; leur teneur en illite croît de 50 à 80 p. 100.

Pour ces sols à dominance d'argile illitique riche en ions K^+, les courbes K_0 montrent des teneurs en K^+ plus élevées que pour les sols chloritiques précédents. Les teneurs maxima en K^+ adsorbé y dépassent toutes 72 p. p. m. de sol et les concentrations d'équilibre 5 mg/l.

Mais ce sont surtout les courbes K_2 correspondant aux sols ayant reçu des engrais potassiques qui, pour ces 4 sols illitiques, présentent des dimensions beaucoup plus étendues que pour les sols chloritiques précédents. Les différences Maxima-minima se situent entre 97 et 187 p. p. m. de sol pour le K adsorbé et entre 21,8 et 39,3 mg/l pour les concentrations d'équilibre en K. Ces divers chiffres traduisent un très fort pouvoir de rétention des argiles illitiques micacées fermées à l'égard des ions K^+ apportés sous forme d'engrais (rétention sous forme adsorbée échangeable). Les pertes par lessivage des ions K^+ se trouvent ici considérablement réduites.

c) L'argile du *sol de la Malmare*, avec 50 p. 100 d'illite, contient en mélange 20 p. 100 de montmorillonite. Cette dernière argile, naturellement pauvre en potasse, présente une structure ouverte où les ions K^+ de l'engrais ont tendance à pénétrer plus profondément que dans les argiles micacées précédentes aux fentes fermées.

d) A *Ablis*, dont l'argile renferme, à côté de 40 p. 100 de chlorite, 60 p. 100 d'illite légèrement entrouverte, on observe des chiffres relati-

vement élevés pour les teneurs en K adsorbé en K_0 (78 p. p. m.)et surtout en K_2 (160 p. p. m.).

Par contre, la concentration d'équilibre de la phase liquide s'abaisse fortement (1,8 mg/l en K_0, 7,8 mg/l en K_2), ce qui traduit une rétention énergique des ions K^+ par la phase solide.

e) Ce phénomène s'accentue plus encore dans les *sols de Lieusaint*. Ici l'argile est constituée pour 70 p. 100 d'illite en voie d'ouverture légère, à côté de 20 p. 100 de kaolinite et d'un peu de chlorite. Fait que nous n'avons pas observé jusqu'ici, les deux courbes K_0 et K_2 se confondent sensiblement.

En K_0, la teneur en K adsorbé est remarquablement élevée. C'est la plus forte de toute la série (116 p. p. m. du sol). L'ouverture légère des fentes d'illite paraît s'accompagner de la libération d'un nombre important d'ions K^+ internes du réseau cristallin. Mais, chose nouvelle également jusqu'ici, la teneur en K adsorbé à l'origine en K_2 reste du même ordre de grandeur qu'en K_0. L'apport abondant d'engrais potassiques en K_2 n'a donc pas augmenté visiblement les teneurs en K adsorbé, comme si la totalité des ions apportés avait subi une véritable capture à l'entrée des fentes de l'illite entrouverte.

La concentration d'équilibre en K^+ de la phase liquide n'est pas moins remarquable. Très faible en K_0 à l'origine (2,9 mg/l de K^+), elle est du même ordre de grandeur en K_2, où elle se trouve être de beaucoup la plus faible de toutes celles observées dans ce travail ; ce fait paraît confirmer un phénomène de capture des ions K^+ par les fentes entrouvertes de l'illite.

3° **Conclusions.**

La comparaison des courbes de désorption des ions K^+ et des analyses minéralogiques des argiles permet de diviser ces sols en quatre types principaux :

a) Les sols à argile chloritique dominante, naturellement pauvre en potassium et adsorbant faiblement les ions K^+ apportés sous forme d'engrais.

b) Les sols à argile illitique micacée fermée dominante, naturellement mieux pourvue en potassium, mais surtout retenant mieux par adsorption les ions K^+ des engrais.

c) Les sols à argile partiellement montmorillonitique à structure ouverte, retenant les ions K^+ des engrais en partie sous forme interne.

d) Les sols à argile illitique à fentes légèrement entrouvertes fixant avec l'intensité la plus forte les ions K^+ apportés sous forme d'engrais potassiques.

II. — NATURE DES ARGILES EN ENRICHISSEMENT DES SOLS PAR LES ENGRAIS

Les teneurs en K échangeable des sols des parcelles K_0 et K_2 de ces douze champs d'essais sont rassemblées dans le tableau III. Ces résultats conduisent aux remarques suivantes :

Pour les parcelles K_0, n'ayant pas reçu d'engrais potassiques, les teneurs en K échangeable sont uniformément plus basses dans les cinq premiers champs à argile chloritique dominante que dans les sept champs suivants à argile illitique dominante.

TABLEAU III

Champs d'essais d'engrais potassiques potassium et pomme de terre.

Champs d'essais	K échangeable m. eq./kg de sol		Argile % terre fine	Humus Chaminade °/oo	Réaction pomme de terre	
	K_0	K_2			I_{p_0-1}	I_{p_1-2}
Petit Bêle	0,75	1,4	14,5	1,52	1,04	0,15
St-Jean du Gard	1,2	1,7	10,2	0,22	1,04	0,06
La Harpe	1,5	3,6	10,5	0,7	1,37	0
Pompignac	1,7	2,6	12,3	0,41	0,31	0
Pau-St-Léon	1,1	4,0	21,3	6,75	0,52	0,33
Moyenne	*1,25*	*2,6*			*0,86*	*0,10*
Woippy	1,9	1,3	5,8	0,75	0,31	0
Beaucouzé	1,9	5,2	12,0	0,79	1,14	0,16
Toulouse-Thibaut	1,95	5,2	17,3	0,34	0,72	0,61
Levet	2,5	4,6	13,5	0,35	1,31	0,16
Moyenne	*2,0*	*4,0*			*0,87*	*0,23*
La Malmare	1,8	2,8	12,0	?	1,64	0,18
Ablis	2,0	4,25	17,5	0,28	1,25	0,19
Lieusaint	2,9	2,6	16,7	0,4	0,64	0,31

Pour les parcelles K_2, ayant reçu des fumures potassiques renforcées pendant toute la durée des essais, les teneurs en K échangeable sont, en moyenne, moins élevées en sols chloritiques et plus élevées en sols illitiques. Font cependant exception, avec des teneurs assez basses en K échangeable en K_2, le sol de Woippy, particulièrement pauvre en argile (5,8 p. 100 de la terre fine) et renfermant des proportions égales d'illite et de chlorite, celui de la Malmare qui contient 20 p. 100 de montmorillonite retenant entre ses feuillets une certaine proportion des ions K^+ des engrais, enfin celui de Lieusaint, riche en argile illitique partiellement ouverte fixant fortement les ions K^+.

Pour des apports équivalents d'engrais potassiques, on observe donc en général des teneurs en K échangeable plus élevées en sols illitiques qu'en sols chloritiques, d'une part en raison d'une libération très lente des ions K^+ présents dans les espaces interfoliaires de l'illite (sols K_0) et d'autre part grâce à une rétention plus forte des ions K^+ des engrais à la surface des microcristaux d'illite (sols K_2).

III. — NATURE DES ARGILES ET RÉACTION DES CULTURES AUX ENGRAIS POTASSIQUES

Comment ces phénomènes de libération des ions K^+ des argiles et de rétention des ions K^+ des engrais se traduisent-ils dans l'augmentation des rendements des plantes cultivées sous l'effet des engrais potassiques? La pomme de terre étant la plante la plus sensible aux fumures potassiques, c'est à elle qu'il y a lieu de s'adresser en premier lieu pour obtenir une réponse à cette question.

Nous avons utilisé pour cela les indices I_{po-1} et I_{p1-2} établis précédemment pour les divers champs d'essais (2). Ces indices représentent l'augmentation relative des rendements moyens en pomme de terre procurée par un apport de un kg de potassium entre 2 traitements voisins : K_0 sans engrais potassiques et K_1 fumure potassique moyenne ; K_1 fumure potassique moyenne et K2 fumure potassique renforcée. Ces augmentations moyennes ont été calculées pour la période d'essais 1952-1957.

Les apports modérés d'engrais potassiques K_1 ont amené des augmentations moyennes de rendements en tubercules (I_{po-1}) de 0,86 p. 100 par kg de K apporté pour les cinq premiers champs à dominance chloritique (variation de 0,31 à 1,37 p. 100), contre 0,87 p. 100 pour les 4 champs où l'illite fermée est prédominante (0,31 à 1,31 p. 100). L'action moyenne sur la pomme de terre de doses modérées d'engrais potassiques ne s'avère donc pas plus marquée en sols chloritiques pauvres en potasse qu'en sols illitiques, sans doute parce que les ions K^+ internes de l'illite sont peu assimilables par la pomme de terre.

Au contraire, les fortes doses K_2 d'engrais potassiques se montrent moins efficaces dans les sols chloritiques qui retiennent mal les ions K^+ des engrais (indice I_{p1-2} : 0,10 p. 100 en moyenne) que dans les sols illitiques où les ions K^+ sont fortement fixés (indices I_{p1-2} 0,23 p. 100 en moyenne).

Cependant, il y a lieu de remarquer que, si les indices I_{p1-2} sont particulièrement bas en sols chloritiques à St-Jean-du-Cardonnay, la Harpe et Pompignac (0,06, 0 et 0 p. 100), ils atteignent des chiffres plus élevés au Petit Bêle (0,15 p. 100) et à Pau-St-Léon (0,33 p. 100). A quoi peut-on attribuer cette action plus efficace des doses renforcées d'engrais potas-

siques sur ces deux champs à argile présentant le même taux dominant de chlorite?

La colonne voisine du tableau III permet de constater que le taux d'humus déterminé par la méthode Chaminade est particulièrement élevé dans ces deux derniers champs : 1,52 et 6,75, contre moins de 0,75 p. 1000 dans les 3 autres champs. L'humus, au Petit Bêle et à Pau-St-Léon, se trouve être assez abondant pour retenir une certaine quantité d'ions K^+ et réduire les pertes par lesssivage toujours à craindre en sols chloritiques.

Dans les 4 sols à illite fermée, l'augmentation supplémentaire moyenne des rendements en tubercules dûe à l'apport de doses renforcées K_2 atteint en moyenne 0,23 p. 100 par kg de K. Le besoin plus élevé en potasse des pommes de terre en milieu illitique, qu'il s'agisse d'illite micacée fermée ou d'illite partiellement ouverte, est à rapprocher du pouvoir de rétention plus élevé de ces argiles vis-à-vis des ions K^+ des engrais.

Cependant un des 4 champs considérés fait exception, celui de Woippy, pour lequel l'indice I_{p1-2} est sensiblement nul, ce qui indique une absence d'action supplémentaire des doses renforcées de potasse par rapport aux doses moyennes. Le fait est à rapprocher de la pauvreté en argile de la terre fine de Woippy qui n'en contient que 5,8 p. 100 contre plus de 12 p. 100 dans les autres champs à argile illitique dominante. On peut attribuer ce comportement particulier à la faiblesse du pouvoir adsorbant du sol de Woippy.

Le champ de Lieusaint, par contre, riche en illite partiellement ouverte et comportant un pouvoir de fixation particulièrement énergique vis-à-vis des ions K^+, donne des récoltes de pommes de terre qui vont en augmentant avec les apports croissants d'engrais potassiques.

Nous avons indiqué ailleurs qu'à Lieusaint, les rendements en pomme de terre présentaient une sensibilité particulière aux conditions climatiques (3, 4). La baisse particulièrement accusée des rendements par temps sec peut s'expliquer par un renforcement de la fixation des ions K^+ par l'illite entrouverte sous l'influence de la dessiccation : celle-ci referme les feuillets d'argile et peut s'opposer à l'assimilation des ions K^+ fixés.

On retrouve le même phénomène moins accentué à Ablis, où l'illite présente une certaine ouverture des feuillets. Il est moins net à Beaucouzé et à Levet, aux argiles illitiques fermées et n'apparaît pas à Woippy en sol très pauvre en argile et à teneur sensiblement égale en illite et en chlorite.

Ce phénomène ne se présente pratiquement pas en sols à argiles chloritique et kaolinitique.

IV. — CONCLUSIONS

On peut conclure de ces essais que l'action favorable des engrais potassiques à doses moyennes (K_1) sur les rendements en pomme de terre est sensiblement la même en sols chloritiques pauvres en ions K^+ et en sols illitiques plus riches.

En sols à argile chloritique dominante, le faible pouvoir de rétention vis-à-vis des ions K^+ exige que les fumures potassiques à doses moyennes soient fréquemment renouvelées, plutôt qu'apportées à intervalles plus espacés et à doses très élevées.

Dans ces mêmes sols, l'apport d'humus est un facteur important d'amélioration, l'humus s'ajoutant à l'argile pour retenir temporairement les ions K^+ des engrais.

En sols illitique et montmorillonitique retenant avec plus d'énergie les ions K^+ des engrais potassiques, des doses renforcées d'engrais potassiques, donnant satisfaction à la fois aux besoins en potasse de la plante et du sol, sont au contraire nécessaires pour permettre l'obtention des rendements en tubercules les plus élevés.

RÉSUMÉ

La présente étude comporte une série de graphiques montrant l'allure des phénomènes d'adsorption et de désorption des ions K^+ dans les sols des parcelles K_0 sans engrais potassiques et K_2 à fortes fumures potassiques de 12 champs d'essais d'engrais potassiques. L'allure des courbes varie en fonction de la nature minéralogique des argiles des sols à dominante chloritique ou illitique ; elle est plus ou moins modifiée par la présence de montmorillonite ou d'humus.

La teneur en K^+ échangeable de ces sols en K_0 et en K_2 est en moyenne plus élevée en sols à dominante illitique qu'en sols chloritiques, mais les besoins en engrais potassiques de la pomme de terre sont au contraire plus élevés en sols illitiques en raison du pouvoir de fixation plus énergique de cette argile vis-à-vis des ions K^+ des engrais potassiques.

SUMMARY

Influence of the nature of clays on the dynamics of soil potassium in some experimental fields.

The curves presented show the trends of adsorption and release of K ions in soils of the K_0 plots receiving no potash fertilizer, and of the K_2 plots given heavy dressings of potash, in the 12 experimental fields with potash fertilizing. The shape of the curves varies according to the mineralogical nature of clays in soils of chlorite or illite predominance ; the shape of the curves is more or less modified by the presence of montmorillonite or humus.

The exchangeable-K content in soils of the K_0 and K_2 plots is generally higher in illitic soils than in those containing predominantly chlorites ; the potassium requirements of potato are, on the other hand, higher in illitic soils, due to the higher fixation of fertilizer K by this type of clay.

ZUSAMMENFASSUNG

Einfluss von Tonmineralienarten einiger Versuchsfeldböden auf die Dynamik des Kaliums.

Die vorliegende Arbeit beträgt eine Anzahl graphischer Darstellungen, welche die Adsorptions-und Desorptionserscheinungen der K-Ionen in Böden veranschaulichen die von ungedüngten K_0-Parzellen, sowie mit starken Kaligaben gedüngten K_2-Parzellen, aus zwölf Kalidüngungsversuchsfeldern herrühren.

Die mineralogische Verschiedenartigkeit der Tone dieser Böden welche eine chloritische oder illitische Dominante aufweisen, bedingt jeweils die Form dieser Kurven.

Der Gehalt dieser K_0-und K_2-Böden an austauschbarem K liegt, im Mittel, viel höher in Böden mit illitischer, als in solchen mit chloritischer Dominante ; jedoch sind die Bedürfnisse an Kalidünger der Kartoffel viel höher in illitischen Böden da das Bindungsvermögen dieser Tonart gegenüber den K-Ionen der Kalidünger, viel energischer ist.

Влияние природы глин на динамику калия в почвах некоторых опытных полей.

Ж. Ж. ФРАНК-ДЕ-ФЕРРИЕР, Р. БЛЯНШЭ, Ж. ХИЙО и Т. КАМЭЗ.
(Альзасский Калий, Шатору и Страсбургский Университет).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Представляемая работа содержит серию чертежей, показывающих ход явлений адсорбции ионов K^+ в почвах площадок K_0 без калийных удобрений и K_2 с сильными дозами калийных удобрений двенадцати опытных полей изучающих калийные удобрения. Ход кривых изменяется в зависимости от минералогической природы глин почв с преобладанием хлорита или иллита; он более или менее изменяется присутствием монтмориллонита или гумуса.

Содержание обменного K^+ этих почв при K_0 и при K_2 в среднем более высоко в почвах где преобладает иллит, но потребность картофеля в калийных удобрениях, напротив, более значительна в иллитовых почвах, так как поглотительная способность этой глины по отношению к ионам K^+ калийных удобрений более велика.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) BLANCHET (R.). — Énergie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition des plantes minérale. *Ann. Agro.*, **2**, 125-153, 1959.

(2) STRASMAN (A.), QUIDET (P.), BLANCHET (R.). — Dynamique du potassium dans le sol et alimentation potassique des plantes. *Ann. Agro.*, **5**, 635-658, 1958.

(3) FRANC DE FERRIÈRE (J.), CAMEZ (T.) et MILLOT (G.). — Influence des types d'argile des sols et de la pluviosité sur la nutrition potassique de la pomme de terre. *Ann. Agro.*, **1**, 51-72, 1958.

(4) FRANC DE FERRIÈRE (J.). — Plantes sarclées et pluviosités sur sol illitique. *Bull.* AFES, **5**, 219-231, 1959.

631. 871 : 631. 46

L'ENFOUISSEMENT DES PAILLES DANS LE SOL ÉTUDE GÉNÉRALE ET RÉPERCUSSIONS SUR LA MICROFLORE DU SOL (1)

PAR

M^me G. SIMON
Station d'Agronomie, Versailles.

PLAN DU MÉMOIRE

DEUXIÈME PARTIE

RÉPERCUSSIONS DE L'ENFOUISSEMENT DES PAILLES SUR LA MICROFLORE DU SOL

CHAPITRE I

MODE OPÉRATOIRE ET MÉTHODES UTILISÉES

I. — Mode opératoire

II. — Méthodes utilisées
- A) Flore totale
- B) Différents groupes de microorganismes

CHAPITRE II

INFLUENCE DE LA PAILLE SUR L'ACTIVITÉ DE LA MICROFLORE TOTALE ET SUR SON DÉVELOPPEMENT

Evaluation de la microflore totale

CHAPITRE III

INFLUENCE DE LA PAILLE SUR LES CYCLES DE L'AZOTE ET DU CARBONE

I. — Cycle de l'azote
- A) Fixation aérobie
- B) Ammonification
- C) Nitrification

(1) Pour la première partie de ce mémoire voir *Ann. Agro.* N° 1, 1960.

II. — Cycle du carbone
A) Bactéries cellulolytiques aérobies
B) Bactéries cellulolytiques anaérobies
1° à 55°
2° à 28°
C) Champignons
D) Bactéries amylolytiques

CHAPITRE IV

CONCLUSIONS

TROISIÈME PARTIE

ENFOUISSEMENT DES PAILLES ET CULTURES

CHAPITRE I

LES DONNÉES DE L'EXPÉRIMENTATION AGRICOLE

CHAPITRE II

ESSAIS EN VASES DE VÉGÉTATION

I. — Mode opératoire
II. — Résultats obtenus pour la plus faible dose d'azote ammoniacal ajoutée
A) La première année
B) Les années suivantes
III. — Résultats obtenus pour la plus forte dose d'azote ammoniacal ajoutée

CHAPITRE III

CONCLUSIONS

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

DEUXIÈME PARTIE

RÉPERCUSSIONS DE L'ENFOUISSEMENT DES PAILLES SUR LA MICROFLORE DU SOL

Ainsi que nous venons de le voir, la première partie de notre travail a été consacrée à une étude générale, essentiellement chimique de l'enfouissement des pailles. Nous essayons alors, dans cette seconde partie,

de mettre en évidence l'influence de cette pratique culturale sur la microflore du sol et de préciser le mécanisme biologique de l'attaque de la paille.

Dans un sol, les différents groupes de microorganismes sont en équilibre dynamique et le but de notre étude consiste à suivre les variations de cet équilibre au cours du temps, après un enfouissement de pailles en présence ou en absence d'azote ammoniacal. Il faut alors avoir une connaissance aussi complète que possible, à un moment donné, de l'état biologique du sol envisagé. Nous ferons pour cela une numération et une évaluation de l'activité de la microflore totale, ainsi que des différents groupes de microorganismes susceptibles d'être influencés par cet apport de matière organique.

CHAPITRE PREMIER

MODE OPÉRATOIRE ET MÉTHODES UTILISÉES

I. — MODE OPÉRATOIRE

Comme pour la première partie du travail, 2 p. 100 de paille fine de blé sont mélangés intimement avec la terre des Petits Closeaux et l'humidité, amenée à 30 p. 100, soit avec de l'eau, soit avec une solution de sulfate d'ammonium, est maintenue constante pendant la durée des expériences, soit 8 mois. Ce temps paraît suffisant pour mettre en évidence ce qui se passe dans la nature, nos essais étant réalisés dans des conditions favorables de température (28°) et d'humidité, ce qui comme nous l'avons déjà vu entraîne une accélération des phénomènes.

L'humidité adoptée est plus forte que celle utilisée dans la première partie, afin de faciliter certains phénomènes microbiens (nitrification...) souvent ralentis par suite d'une humidification trop faible du milieu.

La terre employée est toujours fraîchement prélevée ; ainsi l'équilibre de la microflore ne se trouve pas modifiée par un séjour de la terre à la température du laboratoire.

Cette étude microbiologique est faite en présence de quatre doses d'azote ammoniacal, les mêmes que celles qui ont été indiquées dans la première partie, lors des mesures de dégagement de CO_2. Il s'agit de 5, 10, 23,3 et 46,4 mg d'azote ammoniacal que nous ajoutons aux mélanges 100 g terre $\pm$ 2 g paille.

Après des temps d'incubation variables à 28°, nous prélevons des échantillons des mélanges sur lesquels sont faites les différentes analyses microbiologiques.

Un essai préliminaire avec la terre des Petits Closeaux a permis de déceler une carence en acide phosphorique grâce aux Azotobacter, très sensibles à la présence de phosphore. En effet, sur une plaque moulée faite avec cette terre additionnée de 1 p. 100 de glucose, les Azotobacter ne se développent pas. Si par contre, on enrichit ce sol avec du phosphate monopotassique, de nombreuses colonies apparaissent à la surface de la plaque moulée : les Azotobacter, par conséquent, existent dans ce sol à l'état de repos et il leur suffit d'un apport d'acide phosphorique pour qu'ils puissent proliférer. En faisant varier la dose de phosphate monopotassique ajoutée, nous constatons que 0,4 p. 100 au moins de ce sel sont nécessaires pour obtenir un développement satisfaisant des Azotobacter. Au-dessous de ce taux, les colonies sont petites et clairsemées. Pour tous les essais de cette seconde partie, nous enrichissons notre terre au préalable avec 0,4 p. 100 de phosphate monopotassique (mis en solution), afin de nous placer, dès le départ, dans des conditions normales.

II. — MÉTHODES UTILISÉES

Les analyses microbiologiques exigent beaucoup de soin. Elles doivent avant tout respecter les relations qui existent entre les différents groupes de microorganismes. D'autre part, des difficultés surgissent quand il s'agit de faire des ensemencements avec des dilutions [1] de sol. Il est, en effet, très difficile d'obtenir une suspension homogène de micro-organismes, car très souvent les microcolonies de bactéries, d'actinomycètes et de champignons sont adsorbées sur les particules colloïdales du sol.

La plupart des méthodes proposées par Pochon (41) dans son Manuel d'analyse microbienne des sols, nous sont d'une grande utilité pour faire l'étude de cette seconde partie.

A. — Flore totale.

L'activité globale de la terre est évaluée à l'aide des deux techniques généralement employées par la majorité des chercheurs : mesure de dégagement de gaz carbonique (18) et évaluation de la microflore totale.

L'analyseur de gaz nous rend de grands services pour les mesures de dégagement de CO_2. Ces mesures, ainsi que nous l'avons déjà mentionné ne traduisent en fait que la résultante de tous les phénomènes microbiens du sol. Les chiffres obtenus indiquent seulement la somme algébrique des processus microbiens libérant du gaz carbonique et de ceux utilisant ce CO_2 pendant le même temps.

(1) La dilution 10^{-1} est obtenue en réalisant une suspension homogène avec 1 g terre et 9 cc eau stérile. On passe à la dilution 10^{-2} en ajoutant 9 cc eau stérile à 1 cc de la dilution 10^{-1} et etc...

Les mélanges (terre + azote ± paille) sont mis dans des erlenmeyers fermés et, après chaque mesure, l'humidité des essais est vérifiée et corrigée et l'aération des erlenmeyers faite soigneusement. Il est nécessaire d'opérer toujours dans les mêmes conditions, afin de pouvoir comparer les résultats entre eux.

La numération de la microflore totale est faite dans un milieu liquide d'extrait de terre. Huit jours après les ensemencements avec des dilutions de terre, les tubes positifs (où s'est développée une culture), sont comptés statistiquement et une simple lecture sur la table de Mac Crady (41) permet alors d'évaluer le nombre de germes présents dans la terre. Ce milieu d'extrait de terre semble être idéal pour cette étude. Il est, en effet, le reflet de la solution du sol et contient ainsi tous les éléments nutritifs nécessaires à la croissance des microorganismes. En réalité tous les germes du sol ne peuvent pas se développer dans un tel milieu : certains sont trop spécialisés et leur prolifération y est impossible, exemple : les nitrificateurs. Les chiffres obtenus sont donc nettement inférieurs à ceux de la réalité, mais ils nous permettent toutefois de comparer entre elles les terres qui ont subi différents traitements.

B. — **Différents groupes de microorganismes.**

Des techniques variées sont utilisées pour évaluer l'activité des différents groupes de microorganismes, mais dans tous les cas, le principe est le même. On se place dans des conditions telles que l'activité du groupe étudié soit électivement stimulée et puisse ainsi être appréciée quantitativement.

La technique simple de Winogradsky (42) permet d'étudier la fixation aérobie ainsi que la cellulolyse aérobie. Un milieu solide inerte (gel de silice), imprégné d'une solution nutritive, est, tantôt saupoudré de pyruvate de sodium (pour les fixateurs aérobies), tantôt enrichi en nitrate et recouvert d'un papier filtre (pour les cellulolytiques aérobies), puis ensemencé avec des grains de terre d'égale grosseur. Après un certain temps à 28°, nous comptons le pourcentage de grains positifs (autour desquels se développent des colonies) et nous avons ainsi une approximation comparative du phénomène microbien étudié, car la grosseur des grains, leur choix sont autant de facteurs qui interviennent et peuvent modifier le résultat.

Pour d'autres microorganismes, tels que les ammonifiants, les nitrificateurs, les amylolytiques, les ensemencements sont faits avec des dilutions de terre, dans des milieux liquides électifs. Au cours du temps et en fonction de la dilution, on suit la disparition d'un produit, l'apparition d'un autre. Ainsi, par exemple, pour l'amylolyse, on suit colorimétriquement l'hydrolyse de l'amidon et sa transformation en dextrines.

Cette méthode se rapproche peut-être moins des conditions naturelles que la précédente ; elle présente cependant des avantages ; elle permet de juger de la vitesse de la réaction, de sa limite et d'établir alors une comparaison entre les différents essais.

L'étalement des dilutions de sol à la surface du milieu de MARTIN (43) contenant du Rose Bengale et de la Streptomycine, cause le développement presque exclusif des champignons. Les actinomycètes et les bactéries sont éliminés en grande partie sur ce milieu qui, altérant la morphologie des colonies, ne peut servir qu'à une numération des fungi.

Nous pensons, grâce à ces méthodes variées, connaître l'état biologique du sol à un moment donné et suivre alors les variations de l'équilibre microbien au cours de l'enfouissement des pailles.

CHAPITRE II

INFLUENCE DE LA PAILLE SUR L'ACTIVITÉ DE LA MICROFLORE TOTALE ET SUR SON DÉVELOPPEMENT

L'évaluation de l'activité de la microflore par la mesure du CO_2 dégagé a déjà été étudiée précédemment (tableaux 17, 18 ; graphiques 8, 9) Nous n'y reviendrons que pour comparer les résultats avec ceux obtenus lors de la numération de la microflore totale.

ÉVALUATION DE LA MICROFLORE TOTALE (44)

Dès les premières lectures, nous nous apercevons que les différentes doses d'azote ammoniacal, ajoutées lors de l'enfouissement des pailles, n'ont aucune influence sur la population microbienne : seule, la paille joue un rôle très net. Aussi, avons-nous limité nos essais à des numérations sur la terre témoin en présence et en absence de paille. Étant donné la richesse en germes de certains de nos essais, nous devons ensemencer les tubes avec des dilutions allant jusqu'à 10^{-11}, (5 tubes par dilution).

Dès les premiers jours, une différence très nette apparaît entre les essais sans paille et les essais avec paille (tableau 48), mais dans les deux cas dès le lendemain de la mise en incubation des essais, et pendant deux jours, nous assistons à une augmentation de la population microbienne, augmentation qui est d'ailleurs plus marquée en présence de paille.

L'explication de ce premier maximum (graphique 14) est facile à donner : initialement notre terre est carencée en acide phosphorique et

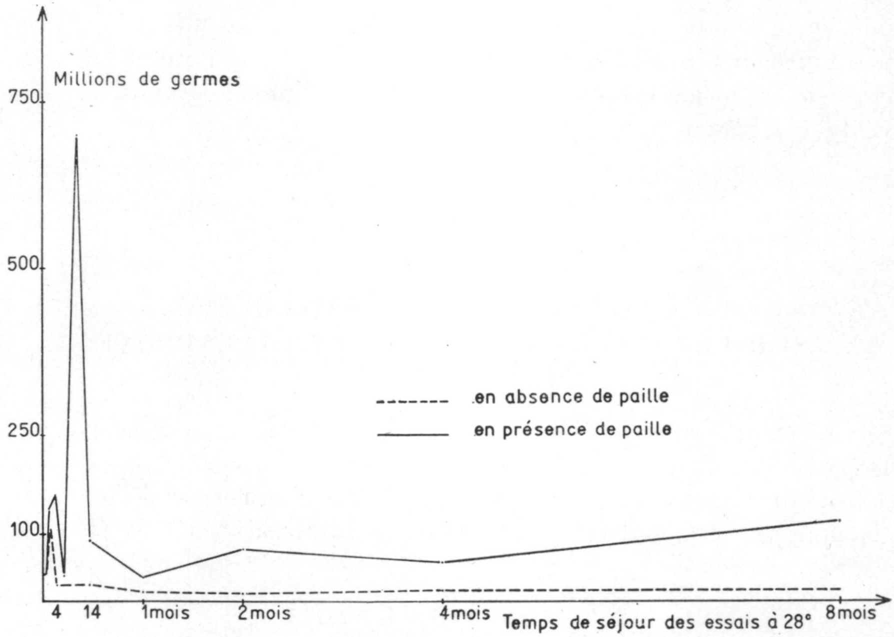
la flore microbienne y mène une vie au ralenti. L'enrichissement en P_2O_5 entraîne un brusque réveil des microorganismes. A cela s'ajoutent les conditions de température et d'humidité (dans lesquelles sont placés les

TABLEAU 48

Numération de la microflore totale.

Durée du séjour des essais à 28°	0 jour	1 jour	2 jours	4 jours	7 jours	10 jours
En absence de paille ...	35	40	110	25	—	25
En présence de paille ...	—	45	140	160	35	700

Durée du séjour des essais à 28°	14 jours	1 mois	2 mois	4 mois	8 mois
En absence de paille	25	13	13	17	17
En présence de paille......	90	35	80	60	120



GRAPHIQUE 14. — Flore totale évaluée en millions de germes par gramme de terre fraîche.

essais) qui, elles aussi, sont favorables au développement et à la prolifération des microorganismes. De plus, l'apport de paille, source d'énergie, ajoute ses effets et stimule l'activité des microorganismes.

Par la suite, en absence de paille, la numération de la microflore totale reste à peu près constante tout au long des 8 mois que dure l'expé-

rience. Il n'en est pas de même, en présence de paille. Un second maximum apparaît vers le dixième jour, puis ensuite la numération se maintient à peu près stationnaire, mais à une valeur supérieure à celle trouvée en absence de paille. Ce maximum pourrait être dû au développement passager de microorganismes qui attaqueraient certains constituants de la paille ou certains produits de dégradation de celle-ci. L'action de cette microflore ne conduirait pas à une dégradation totale, c'est-à-dire jusqu'au stade CO_2 ; en effet la présence de ce dernier n'apparaît pas lors des mesures de gaz carbonique (tableau 17), sauf dans le cas des fortes doses d'azote où il faut noter un petit maximum de dégagement de CO_2 vers le 7e-10e jour, dû vraisemblablement à une attaque plus complète de la paille. Il résulte de ceci que l'absence d'azote minéral, lors d'un enfouissement de paille ne gêne pas le développement des microorganismes, mais diminue simplement leur activité et ralentit ainsi la vitesse de décomposition de la paille.

Il est intéressant de noter, que, mise à part la présence dans certains cas d'un 2e maximum, la richesse en microorganismes reproduit assez fidèlement l'activité globale de la terre obtenue par des mesures de CO_2, phénomène d'ailleurs déjà maintes fois signalé (18) : activité plus grande et microorganismes plus nombreux pendant les premiers jours qui suivent l'enfouissement.

CHAPITRE III

INFLUENCE DE LA PAILLE SUR LES CYCLES DE L'AZOTE ET DU CARBONE

L'enfouissement des pailles en présence d'azote ammoniacal, modifie l'équilibre biologique du sol. Les apports de matières carbonées et d'azote qui en résultent, sont alors susceptibles d'influencer les différents chaînons du cycle de l'azote et du cycle de carbone.

I. — CYCLE DE L'AZOTE

A. — Fixation aérobie.

En premier lieu, est étudiée l'influence de cette pratique culturale sur les fixateurs aérobies.

Un silicogel, imprégné d'une solution saline dépourvue d'azote, et saupoudré de pyruvate de sodium, est ensemencé avec 25 grains de terre d'égale grosseur. Dès le surlendemain, autour des grains, se dévelop-

pent des colonies luisantes, incolores, visqueuses d'Azotobacter ; en vieillissant, ces colonies prennent une teinte brunâtre et sèchent.

Au départ, la terre apparaît moyennement pourvue en grains de terre fertiles, mais dès le deuxième jour, l'enrichissement en acide phosphorique entraîne une prolifération des Azotobacter.

En absence de paille (tableau 49), le résultat est visible immédiatement pour la terre seule et la plus petite dose d'azote. Il faut attendre

TABLEAU 49

Fixateurs aérobies en absence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°	0 jour	2 jours	4 jours	7 jours	10 jours	14 jours	1 mois	2 mois	8 mois
Terre	64	80	72	78	84	88	86	78	84
Terre + 5 mg N (NH_4)	56	76	80	72	70	82	70	86	84
Terre + 10 mg N (NH_4)	68	60	62	76	74	80	86	84	84
Terre + 23,3 mg N (NH_4)	54	52	50	68	62	72	78	80	80
Terre + 46,4 mg N (NH_4)	56	56	52	62	74	74	70	76	70

Les lectures sont faites après 7 jours d'ensemencement et les résultats sont exprimés en pourcentage de grains de terre fertiles. (Essais faits en double).

7 jours pour la 2e et la 3e doses et 10 jours pour la 4e pour voir apparaître une augmentation des pourcentages de grains fertiles. Ces retards s'expliquent facilement. En effet, l'effet nuisible de l'azote ammoniacal vis-à-vis des Azotobacter s'est fait sentir d'autant plus longtemps que la dose d'azote ajoutée au départ est plus importante.

Après 10 jours d'incubation, les pourcentages se maintiennent élevés avec cependant une valeur toujours légèrement inférieure pour la dose d'azote la plus forte.

En présence de paille (tableau 50), les résultats sont identiques, quelle que soit la dose d'azote ammoniacal ajoutée, à part une légère augmentation du pourcentage de grains fertiles pour la plus forte dose d'azote.

TABLEAU 50

Fixateurs aérobies en présence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°	0 jour	2 jours	4 jours	7 jours	10 jours	14 jours	1 mois	2 mois	8 mois
Terre	40	48	88	60	80	80	68	80	84
Terre + 5 mg N (NH_4).	36	68	72	72	80	68	80	80	64
Terre + 10 mg N (NH_4)	44	—	48	84	52	84	88	76	80
Terre + 23,3 mg N (NH_4)	52	68	68	68	84	76	72	80	80
Terre + 46,4 mg N (NH_4)	56	64	60	52	80	92	84	76	64

Les lectures sont faites après 7 jours d'ensemencement et les résultats sont exprimés en pourcentage de grains de terre fertiles. (Essais faits en double).

Nous aurions pu nous attendre à un développement massif d'Azotobacter en présence de paille, étant donné les relations que l'on sait exister entre les Azotobacter d'une part et les cellulolytiques d'autre part : les premiers fixant de l'azote utilisé par les cellulolytiques et consommant les produits de dégradation de la cellulose, lesquels sont essentiellement des acides organiques. Or, il n'en est rien ; peut-être notre terre, dans des conditions convenables, est-elle trop riche en fixateurs, peut-etre les apports d'azote sont-ils gênants pour l'activité de ces fixateurs ?

B. — **Ammonification.**

C'est un des chaînons essentiels du cycle de l'azote, intermédiaire entre la dégradation de la matière organique et la nitrification (3 tubes par dilution).

Nous ensemençons avec des dilutions de terre un milieu liquide où la source unique de carbone et d'azote est fournie par une amide : l'asparagine (45) et nous suivons colorimétriquement avec le réactif de NESSLER l'apparition d'ammoniaque formée dans la solution à partir de l'asparagine. D'après la dilution à laquelle apparaît l'ammoniaque, nous pouvons apprécier l'activité biologique de la microflore ammonifiante. Ce sont des conditions artificielles puisque la dégration d'un seul composé azoté est étudiée.

Les différentes doses d'azote ajoutées, en absence ou en présence de paille ne modifient pas l'activité de cette microflore ammonifiante ; aussi, pour éviter une accumulation de tableaux, nous nous limiterons à ne donner que les résultats intéressant une seule dose d'azote : 10 mg par exemple.

TABLEAU 51

Ammonification en absence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°	Après 1 jour d'ensemencement	Après 3 jours	Après 7 jours	Après 14 jours	Après 21 jours
0	— 1	— 4,5	— 6,3	— 8	— 8
1 jour	0	— 5			
2 jours	— 2	— 5	— 6.3	— 7	— 7
4 jours	— 1	— 5	— 6	— 6	— 6
7 jours	— 2	— 6	— 7	— 7	— 7
10 jours	— 2	— 5,5	— 6,75	— 7	— 7
14 jours	— 1	— 6	— 6,6	— 7	— 7
1 mois	0	— 5	— 6,5	— 7	— 7
2 mois	0	— 5		— 7	— 7
4 mois	0	— 4	— 5,6		
8 mois	0	— 3,7	— 5,75	— 6,3	— 6,6

Les chiffres indiquent le logarithme de la dilution limite à laquelle apparaît l'ammoniaque.
Le 0 signifie une absence d'activité de la part des microorganismes même pour la dilution 10 — 1

L'ammonification est très rapide dans les trois premiers jours qui suivent l'ensemencement. Dès le 3e jour, de l'ammoniaque apparaît en effet à la dilution 10^{-5}, mais par la suite, l'ammonification se ralentit et les dilutions 10^{-7} et 10^{-8} ne sont atteintes qu'après 14 ou même 21 jours.

TABLEAU 52

Ammonification en présence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°	Après 1 jour d'ensemencement	Après 3 jours	Après 7 jours	Après 14 jours	Après 21 jours
0 jour	— 1	— 4	— 6	— 8	— 8
1 jour	— 0				
2 jours..........	— 3	— 6	— 7	— 7	— 7
4 jours..........	— 3	— 7	— 7,4	— 8	— 8
7 jours..........	— 3	— 6	— 7,4	— 8	— 8
10 jours..........	— 1	— 5,5	— 7,75	— 8	— 8
14 jours..........	— 1	— 7	— 7,2	— 8	— 8
1 mois	0	— 6	— 7,2	— 8	— 8
2 mois	0	— 4		— 7,3	— 7,5
4 mois	0	— 5	— 7		
8 mois	0	— 5,3	— 6	— 7	— 7

Les chiffres indiquent le logarithme de la dilution limite à laquelle apparaît l'ammoniaque.

Il faut cependant signaler que la flore ammonifiante paraît moins active, tout au moins au début de l'ensemencement, pour les essais ayant séjourné 14 jours et plus à l'étuve à 28°. Finalement, après 21 jours d'ensemencement, nous trouvons de l'ammoniaque pratiquement jusqu'à la même dilution, indépendemment du temps d'incubation des essais (10^{-7} en absence de paille et 10^{-8} en présence de paille) (tableaux 51 et 52).

La présence de paille influence très peu l'ammonification. ALLISON (46) a signalé que l'apport de matières carbonées dans un sol entraîne une augmentation du nombre des bactéries et de leur activité et en particulier de celle des ammonifiants et des cellulolytiques, mais tout ceci dépend de la nature des matières organiques ajoutées au sol. Les pailles, de par leur constitution, ne sont pas favorables à cette ammonification, tout au moins au début de leur enfouissement. En effet, leur rapport C/N est très élevé : ceci convient mal à l'ammonification qui est proportionnelle à la teneur de la matière organique en azote et inversement proportionnelle à la teneur en carbone. Ultérieurement, quand l'attaque de la paille sera bien avancée, la microflore ammonifiante deviendra plus active ; nous avons trouvé, en effet, dans la première partie de notre travail que l'azote immobilisé au début de la décomposition de la paille sous forme d'azote organique microbien, se transforme peu à peu en composés ammoniacaux, puis nitrates et devient alors utilisable par les végétaux.

C. — **Nitrification.**

Dans des conditions favorables, une partie de l'azote ammoniacal libéré par l'ammonification est oxydé en nitrates.

Nous avons suivi colorimétriquement les deux phases de la nitrification après avoir ensemencé des milieux liquides contenant des sels ammoniacaux ou des nitrites avec des dilutions de terre (COPPIER et BARJAC H. De (47).) (3 tubes par dilution).

L'activité nitrificatrice de nos échantillons est alors appréciée en recherchant, 15 jours après l'ensemencement, la dernière dilution pour laquelle les sels ammoniacaux et les nitrites sont oxydés respectivement en nitrites et nitrates.

Les lectures colorimétriques nous fournissent peu de renseignements sur l'activité des nitrificateurs. Que ce soit en présence ou en absence de paille, dans une terre enrichie ou non en azote ammoniacal, le taux de nitrification est faible. La dernière dilution donnant des nitrites ou des nitrates à partir d'un sel ammoniacal est généralement — 2 ou — 3 avec cependant une légère tendance à une diminution d'activité pour les essais de 4 mois et 8 mois en présence de paille.

Des résultats identiques sont trouvés pour la deuxième phase de la nitrification (tableaux 53 et 54).

TABLEAU 53

Nitrification en absence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°	0 jour	1 jour	2 jours	4 jours	7 jours	14 jours	1 mois	2 mois	4 mois	8 mois
Terre	— 2	— 2	— 3	— 3	— 2	— 2	— 4	— 2	— 2	— 2
Terre + 5 mg N (NH_4)	— 2	— 3	— 2	— 2	— 3	— 3	— 2	— 2	— 2	— 2
Terre + 10 mg N (NH_4)	— 2	— 2	— 2	— 2	— 2	— 3	— 4	— 5	— 2	— 2
Terre + 23,3 mg N (NH_4)	— 2	— 2	— 2	— 3	— 3	— 3	— 5	— 3	— 2	— 2
Terre + 46,4 mg N (NH_4)	— 2	— 2	— 2	— 3	— 2	— 2	— 4	— 2	— 3	— 2

Les chiffres indiquent le logarithme de la dilution limite donnant des nitrates à partir des nitrites.

TABLEAU 54

Nitrification en présence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°	0 jour	1 jour	2 jours	4 jours	7 jours	14 jours	1 mois	2 mois	4 mois	8 mois
Terre	— 2	— 2	— 3	— 2	— 4	— 3	— 5	— 2	— 2	— 2
Terre + 5 mg N (NH_4)	— 2	— 2	— 3	— 5	— 5	— 3	— 2	— 2	— 2	— 2
Terre + 10 mg N (NH_4)	— 2	— 2	— 2	— 2	— 4	— 3	— 2	— 2	— 2	— 2
Terre + 23,3 mg N (NH_4)	— 2	— 2	— 3	— 4	— 2	— 3	— 2	— 2	— 2	— 2
Terre + 46,4 mg N (NH_4)	— 2	— 2	— 6	— 6	— 6	— 3	— 3	— 2	— 3	— 2

Les chiffres indiquent le logarithme de la dilution limite donnant des nitrates à partir des nitrites.

Il était à prévoir que la nitrification ne serait pas influencée par les apports de paille, car elle dépend en premier lieu de l'ammonification qui est elle-même fort peu touchée par l'enfouissement des pailles, ainsi que nous l'avons vu précédemment. MURRAY a d'ailleurs déjà signalé que la paille est sans effet sur les bactéries nitrifiantes du sol (48).

En conclusion, d'après les recherches faites sur les fixateurs aérobies, les ammonifiants et les nitrificateurs, la paille, enfouie directement dans le sol, même en présence d'azote ammoniacal, ne modifie pratiquement pas les activités des différents groupes de microorganismes intervenant dans le cycle de l'azote.

Par contre, la forte proportion de matières organiques qu'elle apporte doit entraîner le développement de toute une microflore carbonée.

II. — CYCLE DU CARBONE

Lors des enfouissements de paille, une quantité importante de cellulose est ajoutée au sol. Or la cellulose représente la source principale du carbone du sol; en effet, elle est le constituant essentiel des tissus végétaux et chaque année de grosses quantités sont apportées à la terre par les déchets de récoltes, les résidus herbacés, la paille... Sa dégradation est un phénomène microbiologique très important pour l'agronomie : c'est la phase intermédiaire entre les matières organiques et l'humus.

L'enrichissement d'un sol en paille va donc amener le développement de toute une flore spécialisée dans l'attaque de la cellulose.

A. — Bactéries cellulolytiques aérobies.

La technique de WINOGRADSKY (42) est employée pour l'étude de ce processus biologique. Des boîtes de Pétri, contenant du silicogel imprégné de la solution nutritive de WINOGRADSKY, elle-même enrichie avec de l'azote nitrique, et recouvertes de papier Durieux sans cendre n° 111 (filtration lente) sont ensemencées avec 10 grains de terre de même grosseur ou avec 10 brins de paille.

Le papier constitue la seule source de carbone fournie aux microorganismes, et ainsi, dans ce milieu électif, la sélection s'opère autour des grains : seuls ceux qui contiennent des germes cellulolytiques s'entourent d'une colonie colorée (49).

En absence de paille, il n'apparaît aucune différence suivant les doses d'azote ammoniacal ajoutées, ni suivant les différents temps d'incubation (tableau 55). Le pourcentage des grains de terre fertiles est faible, il croît légèrement pour des temps d'incubation de 7, 10 jours : les conditions favorables de température et d'humidité ont peut-être

tout simplement stimulé les quelques cellulolytiques présents dans la terre.

TABLEAU 55

Cellulolyse aérobie en absence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°	0 jour	2 jours	4 jours	7 jours	10 jours	14 jours	1 mois	2 mois	8 mois
Terre	30	20	30	40	20	15	10	20	10
Terre + 5 mg N (NH_4)	10	20	5	35	45	25	20	15	5
Terre + 10 mg N (NH_4)	30	20	5	25	40	30	15	35	15
Terre + 23,3 mg N (NH_4)	30	5	30	40	30	15	5	—	—
Terre + 46,4 mg N (NH_4)	15	15	15	45	50	0	15	15	15

Les lectures sont faites après 12 jours d'ensemencement et les résultats expriment le pourcentage des grains de terre fertiles (Essais faits en double).

En présence de paille (tableau 56), par contre une légère augmentation des pourcentages apparaît pour le 2^e^ jour ; dès le 4^e^, c'est alors une véritable explosion : tous ou presque tous les grains de terre sont fertiles, sauf pour la terre sans azote. Les colonies apparaissent très tôt : 48 heures après l'ensemencement, des grains s'entourent de zônes colorées qui s'intensifient peu à peu. Quatre jours après l'ensemencement, on peut déjà

TABLEAU 56

Cellulolyse aérobie en présence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°		0 jour	2 jours	4 jours	7 jours	10 jours	14 jours	1 mois	2 mois	8 mois
Terre	T	30	40	10	60	80	90	70	90	100
	P	0	90	80	100	100	100	70	90	100
Terre + 5 mg N (NH_4)	T	20	50	100	100	90	70	100	90	100
	P	10	90	100	100	100	100	100	100	100
Terre + 10 mg N (NH_4)	T	10	70	60	70	100	90	100	100	100
	P	10	—	100	90	100	100	100	100	100
Terre + 23,3 mg N (NH_4)	T	50	10	100	100	100	100	100	100	100
	P	10	30	0	100	100	100	100	100	100
Terre + 46,4 mg N (NH_4)	T	10	30	100	100	100	100	100	100	100
	P	10	90	100	100	100	100	100	100	100

Les lectures sont faites après 12 jours d'ensemencement (Essais faits en double).
T : pourcentage de grains de terre fertiles
P : pourcentage de brins de paille fertiles

faire des lectures qui, dans bien des cas, coïncident avec celles faites 12 jours après l'ensemencement ainsi que le montre le tableau 57.

La décomposition biologique de la cellulose s'accompagne d'une consommation d'azote par les cellulolytiques dont le développement est favorisé par la présence d'azote minéral dans le milieu (cf. VERONA (50)). On s'explique ainsi les chiffres plus faibles trouvés, tout au moins au début des expériences, pour la terre seule.

Les quatre doses d'azote ammoniacal donnent des résultats voisins : la dose la plus faible paraît suffisante pour satisfaire les besoins des cellulolytiques aérobies.

TABLEAU 57

Cellulolyse aérobie en présence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°		2 jours	4 jours	7 jours	10 jours	14 jours	1 mois	2 mois	8 mois
Terre	T	20	0	40	30	50	80	60	80
	P	50	80	100	40	80	60	50	80
Terre + 5 mg N (NH_4)	T	10	100	100	20	20	90	70	30
	P	60	100	100	100	80	100	70	70
Terre + 10 mg N (NH_4)	T	70	40	70	70	80	80	80	40
	P	0	100	90	50	40	100	90	90
Terre + 23,3 mg N (NH_4)	T	0	100	100	20	30	100	100	60
	P	30	0	10	60	80	80	70	90
Terre + 46,4 mg N (NH_4)	T	20	100	100	100	70	80	60	70
	P	80	100	100	100	100	100	50	50

Les lectures sont faites après 4 jours d'ensemencement.
T pourcentage de grains de terre fertiles,
P pourcentage de brins de paille fertiles.

Jusqu'à environ 1 mois d'incubation, la majorité et même la totalité des grains de terre et des brins de paille sont entourés de colonies « vert gazon » que nous avons identifiées comme étant dues à « *Cellfalcicula viridis* ». La coloration est surtout visible à la face profonde du papier et diffuse en profondeur dans le gel. On trouve également, mais en très petites quantités, des colonies jaune brun.

Après 1 mois d'incubation, les colonies vertes ont totalement disparu ; les grains sont alors entourés de colonies jaune brun, jaune d'œuf, dont un examen au microscope révèle la présence de *Cytophaga* (formes filamenteuses et microcystiques).

Nous avons ainsi deux flores distinctes qui attaquent la paille, la seconde bénéficiant vraisemblablement des produits de dégradation de la première. POCHON a d'ailleurs déjà signalé (25) que la première invasion est fréquemment le fait d'une espèce ou tout au moins d'une espèce dominante. Ce n'est qu'après la consommation de la majeure partie du substrat utilisé comme nourriture par cette espèce de première invasion que d'autres espèces interviennent continuant le cycle de dégradation. On pense qu'il y aurait peut-être une différence de vitesse de croissance entre les espèces ou bien une adaptation particulière d'une espèce à un substrat déterminé.

B. — Bacteries cellulolytiques anaérobies.

Dans des tubes scellés, sous vide, et contenant un milieu nutritif ensemencé avec un poids connu de terre, plongent à moitié des languettes de papier filtre qui représentent l'unique source de carbone du milieu. Si la terre renferme des cellulolytiques anaérobies, le papier se ramollit puis s'affaisse au fond du tube ; il arrive parfois à disparaître complètement si les germes sont très actifs. Le temps nécessaire pour obtenir une attaque du papier permet d'apprécier l'activité des cellulolytiques anaérobies.

Quand le papier commence à se dégrader, il apparaît une pigmentation jaune pâle. En même temps, le milieu nutritif devient noir : il se forme, par suite de la présence de sulfato-réducteurs, du sulfure de fer noir à partir du sulfate ferreux que contenait le milieu de culture.

1° Cellulolyse anaérobie à 55°.

A cette température l'attaque du papier est très rapide. En présence de paille, souvent quatre jours suffisent, alors que parfois en absence de paille, il faut attendre une huitaine de jours pour obtenir le même résultat.

La terre au départ (tableau 58) est déjà pourvue de germes thermophiles cellulolytiques dont l'activité est légèrement augmentée par la présence de paille qui fournit l'aliment de base de ces germes (tableau 59).

Ni l'azote ammoniacal en quantité variable, ni le temps d'incubation des essais, ne modifient l'activité de ces microorganismes.

2° Cellulolyse anaérobie à 28°.

Des résultats identiques sont trouvés pour les cellulolytiques anaérobies mésophiles, mais ici l'attaque est moins rapide. Pour les essais sans paille, il faut attendre un peu plus longtemps pour obtenir une attaque du papier, et de plus le pourcentage de tubes négatifs est plus important.

Ainsi, en 8 mois, pour un total de 135 tubes ensemencés, 42 languettes de papier n'ont pas été attaquées (soit 31 p. 100) en absence de paille, tandis qu'il n'y en avait que 17 (soit 13 p. 100) en présence de paille.

La paille favoriserait très légèrement le développement et l'activité des cellulolytiques anaérobies, thermophiles et mésophiles, mais leur rôle est peu important, comparativement à celui des cellulolytiques aérobies. Il fallait d'ailleurs s'y attendre, car nos conditions d'expérience ne leur sont pas favorables.

Tableau 58

Cellulolyse anaérobie à 55° en absence de paille

Durée de séjour des essais à 28°	1 jour	2 jours	4 jours	7 jours	10 jours	14 jours	1 mois	2 mois	4 mois	8 mois
Terre	5	6	6	6	4	5	5	7	6	> 6 et < 7
Terre + 5 mg N (NH_4)	5	7	5	10	8	7	5	> 6 et < 7	5	> 5 et < 6
Terre + 10 mg N (NH_4)	6	6	> 5 et < 6	7	9	5	4	> 5 et < 6	5	> 5 et < 6
Terre + 23,3 mg N (NH_4)	5	6	5	4	9	7	4	> 6 et < 7	> 5 et < 6	> 5 et < 6
Terre + 46,4 mg N (NH_4)	5	5	> 6 et < 7	5	12	> 5 et < 6	4	> 6 et < 7	5	6

Les résultats expriment le nombre de jours nécessaires pour avoir une attaque du papier (moyenne de 2 ou 3 tubes).

Tableau 59

Cellulolyse anaérobie à 55° en présence de paille

Durée de séjour des essais à 28°	1 jour	2 jours	4 jours	7 jours	10 jours	14 jours	1 mois	2 mois	4 mois	8 mois
Terre	5	4	4	> 5 et < 6	5	5	> 4 et < 5	6	> 5 et < 6	7
Terre + 5 mg N (NH_4)	4	4	5	5	5	6	> 4 et < 5	6	5	> 6 et < 7
Terre + 10 mg N (NH_4)	4	5	5	4	6	6	4	6	6	> 6 et < 7
Terre + 23,3 mg N (NH_4)	5	5	5	4	7	6	4	6	5	> 7 et < 8
Terre + 46,4 mg N (NH_4)	5	5	4	4	5	5	4	7	5	7

Les résultats indiquent le nombre de jours nécessaires pour avoir une attaque du papier (moyenne de 2 ou 3 tubes).

C. — Champignons.

Quelques jours après la mise à l'étuve des mélanges (terre + paille + azote ammoniacal) nous voyons apparaître en surface un abondant mycélium blanchâtre développé généralement à partir des brins de paille ; en même temps, se dégage l'odeur caractéristique des champignons.

L'évaluation de ces champignons inférieurs est faite après étalement de dilution de sol à la surface d'un milieu nutritif gelosé renfermant de la streptomycine et du Rose Bengale (milieu de MARTIN) (43) qui éliminent les bactéries (d'après BAKERSBIEGEL et MILLER) (51), ainsi que les actinomycètes.

Ce milieu, altérant la morphologie et la physiologie des colonies, n'est utilisé que pour les numérations.

Les ensemencements sont réalisés avec des dilutions de terre allant de 10^{-3} à 10^{-7}. Au début de l'enfouissement, pour la dilution -3, les colonies sont très nombreuses, se chevauchent et deviennent très difficiles à compter, aussi des chiffres manquent-ils dans les tableaux.

Malgré l'absence de quelques résultats, l'influence de la paille sur les champignons du sol apparaît nettement.

Les chiffres obtenus pour les essais sans paille (tableau 60) présentent des variations entre eux, mais les différences ne sont pas significatives, si on tient compte de toutes les difficultés techniques rencontrées pour la numération, notamment la fragmentation du mycélium au cours d'un ensemencement ; celle-ci peut, en effet, conduire à des résultats fort variables pour une même dilution.

TABLEAU 60

Champignons en absence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°	0	2 jours	10 jours	14 jours	1 mois	3 1/2 mois	6 mois	8 mois
Terre			53	—	23	30	6	20
Terre + 5 mg N (NH_4)			56	60	26	56	23	36
Terre + 10 mg N (NH_4)			3	60	23	23	33	33
Terre + 23,3 mg N (NH_4)		6	2	23	16	16	23	23
Terre + 46,4 mg N (NH_4)		3	36	36	6	6	46	26

Résultats exprimés en milliers de colonies par gramme de terre fraîche et obtenus pour la dilution 10^{-3} (moyenne de 3 boîtes).

En présence de paille (tableau 61), les colonies sont très nombreuses dès les premiers jours de l'enfouissement, ainsi que le laissaient d'ailleurs prévoir les observations faites sur les mélanges (terre + paille + azote ammoniacal) mis à l'étuve à 28°. Ensuite leur nombre diminue. Nous retrouvons ainsi des résultats déjà cités, en particulier par JENSEN (52)

qui signale le rôle actif des champignons dans les premiers jours suivant l'apport de matières organiques au sol ; ensuite viendrait le tour des bactéries.

TABLEAU 61

Champignons en présence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°	0	2 jours	10 jours	14 jours	1 mois	3 1/2 mois	6 mois	8 mois
Terre				56	86	66	96	110
Terre + 5 mg N (NH_4)				133	50	196	176	166
Terre + 10 mg N (NH_4)				200	76	60	60	313
Terre + 23,3 mg N (NH_4)				136	65	103	200	520
Terre + 46,4 mg N (NH_4)		46	340	260	133	166	123	600

Résultats exprimés en milliers de colonies par gramme de terre fraîche et obtenus pour la dilution 10^{-3} (moyenne de 3 boîtes).

D'après les chiffres trouvés pour le 14e jour (tableau 61) et d'après les courbes correspondantes (graphique 15), l'azote ammoniacal paraît agir favorablement sur le développement de ces champignons. Au début de l'enfouissement, leur nombre est vraisemblablement en rapport ave la quantité d'azote ammoniacal qu'ils ont à leur disposition. Les numérations faites pour la dilution 10^{-4}, au 10e et 14e jour, viennent d'ailleurs confirmer cette hypothèse (tableau 62).

TABLEAU 62

Champignons en présence de paille.

Durée de séjour des essais à 28°	2 jours	10 jours	14 jours	1 mois
Terre	3	9	2	2
Terre + 5 mg N (NH_4)	1	7	3	2
Terre + 10 mg N (NH_4)	4	10	3	3
Terre + 23,3 mg N (NH_4)	4	12	8	3
Terre + 46,4 mg N (NH_4)	1	24	10	2

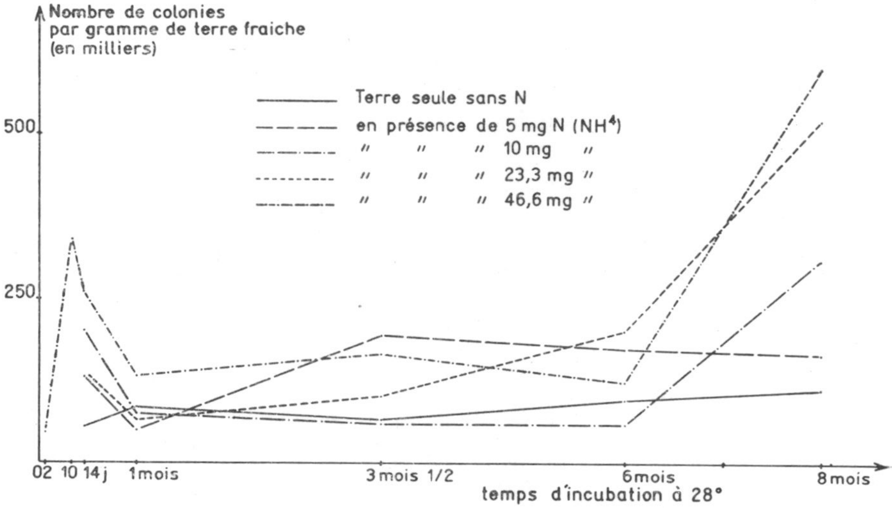
Les résultats indiquent le nombre de colonies obtenues dans 3 boîtes, à la dilution 10^{-4}

On pouvait d'ailleurs s'attendre à ce résultat, car les champignons qui se développent dans nos expériences sont des champignons cellulolytiques présentant les mêmes besoins azotés que les bactéries cellulolytiques.

Au 8e mois, il y aurait une reprise du développement des champignons (graphique 15), reprise qui serait d'ailleurs d'autant plus importante que la dose d'azote ammoniacal apportée au départ en même temps que la paille est plus forte. Il se peut que les champignons viennent alors compléter l'action des bactéries en les aidant à attaquer les composés plus résistants de la paille, notamment la lignine dont la majeure partie serait,

d'après certains auteurs (53), lentement décomposée par des champignons inférieurs filamenteux et par des Basidiomycètes supérieurs. Il faut aussi mentionner que le sulfate d'ammoniaque ajouté à la paille est utilisé en partie par les microorganismes et que le reste nitrifie dans le sol ; le milieu s'acidifie alors légèrement et cette acidification, plus marquée pour les fortes doses, favoriserait le développement des champignons.

Dans une étude sommaire, faite sur le milieu de Czapeck pour identifier les différents champignons qui se développent lors d'un enfouissement de paille, nous trouvons une forte proportion de Penicillium à colonies vertes et blanches.



GRAPHIQUE 15. — Numération des champignons en présence de paille.

Ceci d'ailleurs confirme les idées de MARTIN (54) et de WAKSMAN (55) qui pensent que l'attaque de la cellulose et des composés carbonés dans le sol est faite par des *Aspergillus*, des *Trichoderma*, des *Cladosporium* et surtout par des *Penicillium*.

Les champignons cellulolytiques jouent un rôle important lors de l'enfouissement des pailles : ils complètent l'action des bactéries cellulolytiques aérobies et participent ainsi activement à l'humification des matières organiques.

D. — Bacteries amylolytiques.

En dernier lieu, nous étudions l'influence des enfouissements de paille sur l'activité de la microflore amylolytique du sol, d'après la méthode H. de BARJAC et M. A. CHALVIGNAC (56).

Des ensemencements avec des dilutions de terre sont faits dans un milieu liquide contenant de l'amidon, et nous suivons colorimétriquement la transformation de l'amidon en dextrines ainsi que sa disparition totale.

Rien ne modifie l'allure générale de l'amylolyse, ni la présence de paille, ni l'addition d'azote ammoniacal dans le milieu, ni la durée d'incubation des essais à 28°.

On sait que certains germes amylolytiques sont polyphages et peuvent attaquer la cellulose (Alarie et Gray (57)), or, dans le cas présent, ils n'interviennent pas. Il était nécessaire de faire une étude de l'amylolyse pour le savoir, car les colonies de ces germes polyphages n'étant pas pigmentées, l'étude de la cellulolyse aérobie seule ne nous aurait pas renseignés. Seuls les *Cellfalcicula* et les *Cytophaga* sont donc actifs dans la décomposition des pailles.

CHAPITRE IV

CONCLUSIONS

L'équilibre de la microflore se trouve modifié après un enfouissement de pailles. Ces dernières, en effet, constituent une source notable d'aliments énergétiques pour les microorganismes. De plus, en modifiant certaines propriétés du sol, telles que l'aération, et la rétention en eau, elles agissent indirectement dans un sens favorable à la vie microbienne.

Pour éviter toute confusion, un point doit être tout d'abord signalé. Dès la mise en incubation des essais, nous nous trouvons dans des conditions favorables de température et d'humidité ; de plus, la terre est enrichie en acide phosphorique ; il se produit alors un réveil immédiat de la microflore autochtone. Ce réveil, qui apparaît lors de l'étude de chacun des groupes de microorganismes, a lieu pour tous les essais, avec ou sans paille, avec ou sans azote ammoniacal, et il est alors facile de ne pas le confondre avec une augmentation de l'activité de ces germes, consécutive à l'addition de paille.

En premier lieu, l'activité des microrganismes est stimulée, leur nombre accru après une addition de pailles. Ceci se produit d'ailleurs chaque fois que des matières organiques sont incorporées au sol.

La stimulation de l'activité globale de la microflore, suivie par des mesures de dégagement de gaz carbonique, est immédiate ; elle apparaît dès les premiers jours d'incubation des essais à 28° ; elle est alors très importante, puis ensuite, elle diminue progressivement au fur et à mesure que s'épuisent les ressources énergétiques.

L'addition d'azote ammoniacal, comme le prouvent les mesures de CO_2

exerce une influence favorable sur l'activité des microorganismes, principalement au début de l'enfouissement ; il s'ensuit alors une décomposition plus rapide de la paille.

L'apport de paille entraîne aussi une augmentation du nombre des microorganismes présents dans le sol, ainsi que nous avons pu nous en rendre compte par des numérations de flore totale, et comme pour l'activité, cette augmentation est très marquée au début de l'enfouissement.

Étant donné la lente décomposition de la paille, nous constatons encore, huit mois après l'enfouissement, une stimulation de l'activité globale et un accroissement du nombre des microorganismes.

D'autre part, les additions de paille provoquent également une *stimulation élective* des germes susceptibles d'attaquer les constituants de la paille, notamment la cellulose, présente en forte proportion.

Les différents groupes de microorganismes du cycle de l'azote, fixateurs, ammonifiants et nitrificateurs, ne sont pas influencés par des apports de paille, même en présence de fortes doses d'azote ammoniacal dans le milieu.

Par contre, l'activité des microorganismes cellulolytiques est fortement stimulée : c'est le cas des bactéries aérobies et des champignons cellulolytiques, dont les actions se chevauchent et se complètent. Là encore, l'effet de la paille est immédiat. Les champignons et les bactéries cellulolytiques aérobies apparaissent très tôt après la mise en incubation des essais. Les champignons seraient peut-être les premiers à intervenir, puis ensuite leur activité se ralentirait un peu et reprendrait vers le 8e mois ; ils viendraient alors compléter l'action des bactéries dont l'activité n'a pas faibli tout au long des 8 mois. L'association bactéries-champignons cellulolytiques permettrait alors une attaque plus poussée des composés résistants de la paille, restant encore inaltérés après un séjour de huit mois dans le sol. La dégradation de la paille se fait donc en chaîne. Il faut signaler qu'en ce qui concerne les bactéries cellulolytiques aérobies, ce sont les *Cellfalcicula* qui commencent l'attaque. Après un mois, ils sont remplacés par des *Cytophaga* dont l'action se poursuit longtemps puisqu'on les trouve encore en nombre important lors de la réapparition massive des champignons filamenteux au huitième mois. Chaque groupe de microorganismes bénéficie des produits de dégradation du groupe précédent, et ainsi peu à peu, l'attaque de la paille progresse. Cette progression est d'ailleurs plus rapide si on apporte, en même temps que la paille, de l'azote ammoniacal pour satisfaire les besoins azotés des bactéries et des champignons cellulolytiques.

Seules les bactéries cellulotytiques aérobies sont actives dans cette décomposition, et parmi elles, seuls les *Cellfalcicula* et les *Cytophaga*. Les bactéries cellulotytiques polyphages, sans pigment, n'ont pas été mises en évidence.

Les bactéries cellulotytiques anaérobies mésophiles et thermophiles ne sont que légèrement stimulées, mais il est vrai que nos conditions d'expérience, humidité et aération, ne leur sont pas favorables.

Les bactéries cellulotytiques aérobies et les champignons cellulolytiques jouent donc un rôle très important dans la dégradation de ces pailles et participent ainsi activement à la formation d'humus dans le sol.

TROISIÈME PARTIE

ENFOUISSEMENT DES PAILLES ET CULTURES

CHAPITRE I

LES DONNÉES DE L'EXPÉRIMENTATION AGRICOLE

Nous citerons quelques expériences d'enfouissement de paille au champ, réalisées le plus souvent dans les stations Agronomiques. Elles conduisent toutes au même résultat, à savoir que la paille exerce une action favorable sur les cultures dans les années qui suivent l'enfouissement.

Nous avons déjà mentionné les essais de SOUBIES à Toulouse (17) qui constate une supériorité de la paille sur la fumure minérale seule, à partir de la troisième année qui suit l'enfouissement.

A Versailles, dans un sol de limon, DEMOLON et BURGEVIN (58) avaient déjà remarqué une arrière action favorable de l'enfouissement des pailles.

L'enfouissement annuel à l'automne de 60 quintaux de paille par hectare, provoque un effet dépressif très net, la première et la seconde année, sur le début de développement d'un blé et d'une avoine d'hiver et, peu à peu, cet effet dépressif s'est atténué pour disparaître à la récolte.

A partir de la troisième année, la paille procure des suppléments de rendement très importants (tableau 63). Cette action favorable de la paille serait due en partie à l'azote immobilisé par les microorganismes, et peut-être aussi, dans ce cas, à la potasse qu'elle contient, puisque le sol expérimenté est particulièrement pauvre en potasse.

Plus récemment, BARBIER et BOISCHOT ont entrepris dans les Grands Closeaux, à Versailles, des expériences de longue durée qui démontrent, elles aussi, l'action favorable des enfouissements de paille.

Voici les résultats obtenus pour des enfouissements annuels de 50 quintaux par hectare dans des parcelles, enrichies toutes avec la même fumure phosphopotassique.

TABLEAU 63

Expériences de Demolon et Burgevin.

Année de la récolte	Plantes cultivées	Indice de comparaison	
		sans paille	avec paille
1932	Blé d'hiver	100	100
1933	Avoine d'hiver	100	100
1934	Betteraves fourragères-		
	racines	100	168
	feuilles	100	161
1935	Blé grain	100	160
1936	Betteraves fourragères-		
	racines	100	198
	feuilles	100	115
1937	Blé paille	100	120
1938	Carottes fourragères-		
	feuilles	100	220
	racines	100	280
1939	Avoine de printemps-		
	grain	100	105
	paille	100	97
1940	Maïs fourrage	100	117

Rendements comparatifs témoin = 100

TABLEAU 64 (59)

Année 1949.

	Parcelle témoin sans N minéral	Parcelle avec 20 kg N = N de la paille	80 kg N	120 kg N	160 kg N
En absence de fumure organique	65,3 ± 1,5	66,3 ± 1,6	72,3 ± 1,0	71,2 ± 2,3	69,3 ± 2,4

	Paille seule	Paille + 120 kg N	Paille + 170 kg N
En présence de 50 quintaux de paille par hectare.	68,4 ± 2,8	83,1 ± 3,0	87,6 ± 3,9

Les chiffres indiquent les kg de racines de betteraves récoltés par parcelle de 25 m².

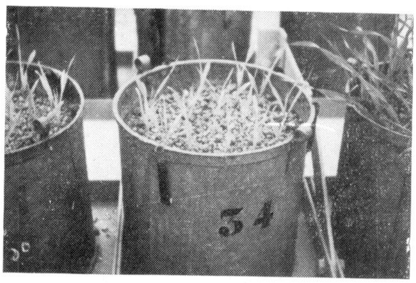
TABLEAU 65 (60)

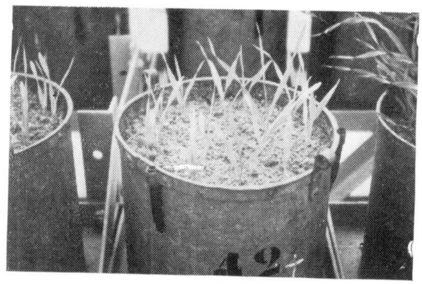
Année 1951.

Azote minéral ajouté en kg par ha	0	20	80	120	160
En absence de paille	38,2 ± 1,5	43,9 ± 1,3	52,35 ± 1,3	55,1 ± 0,5	56,4 ± 0,6
En présence de paille	39,0 ± 1,5			50,3 ± 2,2	54,8 ± 1,4

Les chiffres expriment les rendements obtenus (en tonnes de betteraves par hectare).











Essais en vases de végétation (1re année).

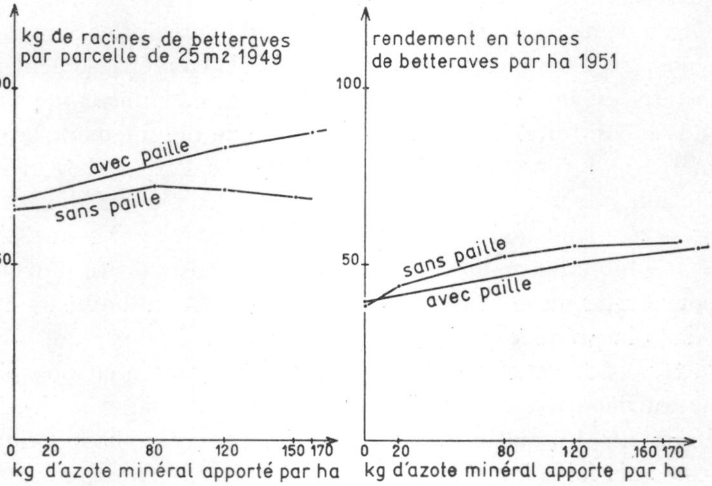
Remarquer :

— le faible développement de l'orge dans les vases contenant de la paille (42) ou du glucose (34)

— la croissance identique de la céréale dans le vase témoin (26) et dans le vase renfermant de la sciure (59)

— le développement exubérant de l'orge là où a été enfoui du foin (47).

La comparaison des courbes de rendement permet de rapprocher les résultats de 1949 de ceux de 1951. En effet, d'après les graphiques (16 et 17), l'effet de la paille ne provoque pas uniquement une simple translation de la courbe de rendement sans déformation, mais encore elle élève le plafond d'utilisation de l'azote.



GRAPHIQUE 16 et 17. — Expériences d'enfouissement de paille au champ.

Ainsi, en 1949, on a pu employer avec bénéfice jusqu'à 70 kg d'azote en présence de paille, cette dernière permet donc d'augmenter la fertilité des sols dans l'immédiat. En même temps, elle améliore le bilan humique à longue échéance ; toutefois cinq années d'expérience (61) ne sont pas suffisantes pour qu'on puisse constater une augmentation notable du taux d'humus stabilisé.

CHAPITRE II

ESSAIS FAITS EN VASES DE VÉGÉTATION

Nous avons cherché à préciser, à analyser et à interpréter les résultats obtenus en plein champ. Dans ce but, nous avons essayé, en serre découverte, de reproduire artificiellement des enfouissements de paille, en utilisant des vases de végétation, d'un emploi très courant à la station de Versailles.

I. — MODE OPÉRATOIRE

Chaque vase renferme environ 10 kg de terre sèche sur une épaisseur de 20 centimètres, ce qui correspond sensiblement à la hauteur de la couche arable.

L'arrosage est fait alternativement à la surface ou par le fond du vase. Généralement, on sème 32 semences de céréales et, après la levée, on ne conserve dans chaque vase que 16 pieds convenablement répartis.

La terre est la même que celle utilisée précédemment pour les expériences de laboratoire. Deux p. 100 de paille de blé finement broyée sont alors mélangés intimement avec cette terre des Petits Closeaux et avec une solution de sulfate d'ammoniaque. Les deux doses d'azote expérimentées correspondent respectivement à 6 et 12 kg par tonne de paille : la dose la plus faible représente la moitié de la quantité d'azote nécessaire pour éviter un effet dépressif. Cette quantité a d'ailleurs été déterminée dans la première partie de notre travail.

La terre des Petits Closeaux, fortement carencée en phosphore, est enrichie au départ avec du phosphate monopotassique, afin d'éliminer les méfaits sur les cultures d'une carence en acide phosphorique.

Les essais faits à la température extérieure, ont porté sur de l'orge de printemps que nous avons semée à peu près trois semaines après l'enfouissement.

Pendant toute la durée de la culture, l'humidité de la terre est maintenue à un taux convenable, de l'ordre de 18 %.

Dans la même série d'expériences, nous comparons la paille avec d'autres matières organiques susceptibles ou non d'être incorporées au sol. Nous avons ainsi enfoui à la dose de 2 p. 100, des substances simples, de composition connue, telles que le glucose, l'amidon, la cellulose (papier filtre déchiqueté) et d'autres plus complexes, d'origine végétale, différant entre elles par leur teneur plus ou moins élevée en azote et par leur plus ou moins grande résistance aux attaques microbiennes : ce sont le foin, la sciure, la lignine, la tourbe. Afin de permettre des comparaisons, nous ajoutons également des vases avec du fumier.

II. — RÉSULTATS OBTENUS, POUR LA PLUS FAIBLE DOSE D'AZOTE AMMONIACAL AJOUTÉE

A. — La première année.

La récolte de l'orge est faite en vert un mois après la levée et en grains à la maturité.

Dans tous les tableaux relatifs aux cultures en vases, la valeur 100

est donnée au rendement obtenu dans le vase témoin, ce dernier étant enrichi de la quantité d'azote ammoniacal reçue par tous les vases de la même série d'expérience.

TABLEAU 66

Expériences en vases de végétation : 1[re] *année.*

Matière organique enfouie	Récolte en vert		Récolte en grains	
	Poids de matière sèche par vase	Indice de comparaison	Poids de grain par vase	Indice de comparaison
Témoin sans apport de matière organique (terre contenant la même quantité d'azote ammoniacal)	21,9	100	33,7	100
Glucose (1)	4,9	22,3	13,3	40,5
Paille	1,6	7,3	2,7	6,3
Foin de luzerne	29,9	136,3	53,2	162,3
Sciure	12,2	55,6	15,8	48,2
Fumier	31,2	142,1	70,8	216

Les poids d'orge récoltés sont exprimés en grammes.

(1) Nous avons craint un trop fort effet dépressif avec 2 % glucose, aussi n'avons nous mis qu'1 % de glucose pour la même quantité d'azote ammoniacal. La récolte alors obtenue pour 1 % de glucose et 6 kg d'N par tonne de paille correspond à une récolte qui aurait été obtenue pour 2 % de glucose et 12 kg d'azote.

Une expérience analogue est faite avec d'autres matières organiques, mais là, toute la récolte est ramassée en vert.

Parallèlement à ces expériences en vases, sont réalisés des essais au laboratoire, suivant la technique déjà décrite précédemment. Cent grammes de terre, additionnés ou non de 2 p. 100 de matière organique, sont mélangés avec 20 cm³ d'une solution de sulfate d'ammonium contenant 5 mg d'N par cm³.

TABLEAU 67

Expériences en vases de végétation : 1[re] *année.*

	Poids de matière sèche par vase	Indice de comparaison
Témoin (terre)	19,950	100
Amidon de riz	5,150	25,8
Tourbe	19,250	96,5
Lignine	18,100	90,7
Cellulose	3,250	16,3

Les poids sont exprimés en grammes.

Après 10 jours d'étuve à 28°, les différences obtenues pour les dosages d'azote minéral total, entre les essais avec et les essais sans matière organique, permettent d'évaluer les quantités d'azote minéral consommées

par les microorganismes et transformées alors en azote organique microbien (62) (tableau 68).

TABLEAU 68

Consommation d'azote minéral par les microorganismes lors de l'enfouissement de différentes matières organiques (à 28°).

après 10 jours.

Matière organique enfouie	Teneur en N de la matière organique enfouie en %	Mg d'N apportés par 2 g de matière organique enfouie	Mg d'N minéral consommés par les microorganismes
Glucose	0	0	32,8
Amidon	0	0	23,8
Paille	0,5	10	23,8
Cellulose (papier filtre déchiqueté)	0	0	20,3
Sciure de bois	0,18	3,6	3,9
Lignine	0	0	3,9
Fumier de cheval (en poudre)	1,72	34,4	7,1
Foin de luzerne	2,38	47,6	2,1
Tourbe de vallée	1,81	36,2	2,1
Feuilles mortes,	1,4	28	0

Les expériences en serre et au laboratoire conduisent aux mêmes conclusions.

Le glucose, l'amidon, se décomposent très rapidement dans le sol. La cellulose et la paille qui renferme une forte proportion de pentosanes et de celluloses (environ 72 à 75 p. 100 de la matière sèche) sont également dégradées assez rapidement. Etant donné que ces quatre substances contiennent peu ou pas d'azote, les microorganismes qui les attaquent, consomment l'azote minéral du sol ainsi que l'azote ammoniacal apporté. Leur consommation théorique, évaluée d'après le tableau 65, atteint 10 à 12 kg d'azote par tonne de matière organique, un peu plus de l'ordre de 16 kg pour le glucose. Dans les vases correspondants qui n'ont reçu que 6 p. 1 000 d'azote, apparaissent très nettement des symptômes de carence en azote. La coloration du feuillage se modifie ; les bords des limbes deviennent vert jaunâtre ; de plus le tallage y est nettement moins important (photos p. 88 bis). Pour le glucose dont la décomposition est plus rapide, l'effet dépressif se marque moins longtemps et à la récolte en grains, il se trouve atténué par rapport à celui de la paille.

La très faible consommation d'azote minéral des microorganismes à 28° en présence de lignine, sciure et tourbe est due à la très lente décomposition de ces matières qui, en dix jours, ne sont presque pas attaquées. Pour la lignine et la tourbe, il n'apparaît pas d'effet dépressif dans les vases. Par contre, pour la sciure, qui se décompose lentement, mais cependant un peu plus vite que la lignine et la tourbe, l'action dépressive nettement moins marquée que pour la paille, se poursuit au cours de

l'année et la récolte en grains ne montre aucune amélioration comparativement à la récolte en vert.

Les feuilles mortes, riches en tannoïdes, résistent à la décomposition en 10 jours à 28°.

Le fumier de cheval et le foin sont très riches en azote. De plus, ils se décomposent facilement, aussi l'azote ammoniacal ajouté est-il très peu consommé. Les plantes, dans les vases, profiteront alors de l'excès d'azote apporté et donneront des rendements nettement supérieurs aux témoins.

D'importantes conséquences pratiques peuvent être tirées de ces résultats. Quand on enfouit, en automne, des matières organiques ayant un rapport C/N élevé (> 30), comme les pailles de céréales, il se produit un stockage temporaire de l'azote minéral du sol (ou de l'azote ammoniacal apporté) à l'état d'azote organique microbien. L'effet immédiat est dépressif.

Les phénomènes sont différents dans le cas des engrais verts ayant un rapport C/N beaucoup plus bas (< 20) : ils constituent une source azotée pour la culture suivant immédiatement leur enfouissement.

B. — **Les années suivantes.**

Les expériences en vases sont continuées pendant plusieurs années sans qu'aucun apport ne soit fait. Ainsi, les résultats obtenus sont dûs aux arrière-actions des enfouissements de matière organique.

A partir de la 2e année, les comparaisons portent sur des récoltes en grains.

Cinq années après leur enfouissement, le foin et le fumier continuent à donner des récoltes nettement supérieures au témoin. Il est vrai qu'ils

TABLEAU 69

Expériences en vases de végétation.

(6 kg d'N par tonne de matière organique).

Matière organique enfouie	1re année	2e année	3e année	4e année	5e année
(Témoin) Terre....	100	100	100	100	100
Glucose	40,5	128	107	107	137
Paille	6	89	151	138	156
Foin de luzerne ...	162	188	155	151	178
Sciure	48	31	67	84	128
Fumier	216	152	162	140	174
Amidon de riz	25,8	148	136	115	104
Tourbe...........	96,5	80	100	94	67
Lignine	90,7	100	100	81	66
Cellulose	16,3	35	121	114	—

Rendements comparatifs.

apportent en même temps que de la matière organique une forte quantité d'azote utilisable par les plantes, plus de 100 kg par hectare, puisque dans nos essais, nous avons volontairement enfoui des doses très fortes de matières organique, afin d'accroître les différences dans les réponses des plantes.

Dès la seconde année, le glucose et l'amidon fournissent des récoltes supérieures au témoin et cette supériorité se maintient encore la 5e année. L'azote minéral, consommé la première année par les microorganismes pour la décomposition de ces substances et transformé en azote organique microbien, commence à se minéraliser l'année suivante et devient progressivement utilisable par les plantes. Celles-ci ont alors à leur disposition une quantité d'azote plus importante que dans les vases témoins.

Il en est de même pour la cellulose et la paille, mais leur décomposition étant plus lente, l'effet dépressif se fait sentir plus longtemps et l'arrière-action n'apparaît que la troisième année. Les récoltes deviennent alors supérieures au témoin. Cette supériorité est plus marquée pour la paille dont l'enfouissement apporte une quantité d'azote non négligeable étant donné les fortes quantités de pailles utilisées dans l'expérience. Nous avions déjà signalé, dans la première partie, la minéralisation progressive de l'azote minéral consommé par les microorganismes lors de la décomposition de la paille. Cette minéralisation était d'ailleurs plus rapide dans les essais faits au laboratoire par suite des conditions favorables de température et d'humidité, alors que les vases sont soumis aux variations climatiques.

La lignine, très résistante, se décompose très lentement et il faut attendre la quatrième et la cinquième année pour s'apercevoir de l'effet dépressif sur les cultures.

La tourbe, comme la lignine, résiste à la décomposition pendant quatre ans.

La sciure, par contre, est moins résistante et se placerait entre la paille et la lignine ainsi que le laisse prévoir sa composition.

La sciure se comporte dans le sol comme la paille. Cependant, sa composition est différente (tableau 70) ; elle est plus pauvre en azote et en matières minérales, elle est plus riche en composés carbonés et résines ; de plus, son application entraîne une acidification du sol, laquelle gêne la croissance des cellulolytiques. Aussi, la décomposition est-elle plus lente que celle de la paille et l'effet dépressif, moins immédiat, est plus durable.

Nos résultats confirment ceux trouvés au champ par ALLISON et ANDERSON (64). La décomposition de la sciure, commencée la première année, se poursuit la seconde année et les cultures accusent alors un fort effet dépressif qui s'atténue progressivement et finalement, la cinquième

année, les vases avec sciure donnent des récoltes supérieures au témoin grâce à l'azote mis en réserve les années précédentes, lors de la décomposition de la sciure.

TABLEAU 70

Composition de la sciure, de la paille et de la lignine.

	Paille de blé en général (63)	Sciure de bois en général ([1])	Lignine
Carbone	40	48 à 54	63 à 64
Pentosanes	30,6	14	
Cellulose	34,3	44 à 45	
Lignine	13,1	16 à 22	
Résines	4,09	1 à 7	
Matières minérales	7,7	0,4 à 2,0	
Azote	0,4 à 0,5	0,18	

Résultats exprimés en %

([1]) Chiffres communiqués par le Centre Technique du bois.

III. — RÉSULTATS OBTENUS POUR LA PLUS FORTE DOSE D'AZOTE AMMONIACAL AJOUTÉE (12 kg N par tonne de matière organique).

Nous obtenons des résultats identiques, mais les effets dépressifs sont moins nets. En effet, les microorganismes ont plus d'azote à leur disposition. La concurrence avec les plantes pour l'azote du sol est alors moins forte et les plantes souffrent moins.

Les effets dépressifs étant moins marqués, les rendements ne s'éloignent pas beaucoup de ceux des vases témoins (tableau 71) : par contre-

TABLEAU 71

Expériences en vases de végétation.

(12 kg d'N par tonne de matière organique.)

Matière organique enfouie	1re année	2e année	3e année	4e année	5e année
Terre (témoin)	100	100	100	100	100
Glucose	93	73	115	112	128
Paille	72	56	154	126	167
Foin de luzerne	168	109	194	152	168
Sciure	88	43	80	83	109
Fumier	190	109	138	169	176
Amidon de riz	82	147	100	98	120
Tourbe	96	102	112	90	75
Lignine	85	87	100	91	71
Cellulose	105	65	81	129	98

Rendements comparatifs, témoin = 100.

coup, les arrière-actions sont moins importantes que dans la première série d'expériences (6 kg d'N par tonne de matière organique).

CHAPITRE III

CONCLUSION

Ces expériences en vases de végétation, intermédiaires entre les essais au laboratoire et les applications pratiques, nous renseignent sur la décomposition de la paille et permettent de comparer celle-ci avec d'autres matières organiques susceptibles d'être enfouies dans le sol. Nous retrouvons ainsi ce que les expériences au laboratoire pouvaient laisser prévoir. En effet, en connaissant, d'une part la composition chimique de ces matières (teneur en azote, nature de l'azote, teneur en cellulose hémicelluloses, lignine) et d'autre part, les quantités théoriques d'azote minéral consommées par les microorganismes au cours de leur décomposition dans le sol, il est facile d'imaginer leur comportement dans les vases. Ainsi, pour des matériaux carbonés riches en azote et facilement décomposables (exemple foin), les besoins en azote minéral sont nuls, la décomposition est rapide et les récoltes excédentaires. Par contre, s'ils sont résistants aux attaques microbiennes, tout en étant riches en azote (cas de la tourbe) les besoins en azote minéral sont encore nuls, mais il n'y a pas de décomposition et les rendements sont voisins du témoin.

Dans le cas des matériaux carbonés, pauvres en azote, la lignine joue un rôle important. Non seulement cette substance se décompose lentement, mais encore sa présence ralentit l'attaque des autres constituants, notamment de la cellulose (65).

Si la proportion de lignine n'est pas très importante (exemple : paille) la matière organique enfouie se décompose assez facilement et l'effet dépressif sur les cultures est d'autant plus marqué que le milieu contient moins d'azote minéral.

Quand la teneur en lignine est plus élevée (exemple : sciure), la matière résiste un peu plus à la décomposition et l'effet dépressif moins intense au début, persistera plus longtemps. Si vraiment, la proportion de lignine est très forte (exemple : lignine), il n'y a pas de dégradation et par suite pas d'effet dépressif sur les cultures.

Ces expériences en vases permettent également de constater les arrière-actions favorables des enfouissements de paille et de certaines autres matières organiques. L'azote ammoniacal, ajouté en même temps que la paille, tout en évitant les diminutions de rendement dûs à la concurrence entre la plante et les microorganismes, n'est pas perdu pour l'agriculteur qui peut constater son action favorable, soit l'année de

l'enfouissement, soit les années suivantes, ainsi que le confirment d'ailleurs des expériences au champ.

A cette arrière-action, il faut ajouter le rôle favorable des apports de paille sur le taux d'humus du sol. D'après Barbier (66), les augmentations du taux d'humus sont suffisantes pour qu'on puisse recommander l'enfouissement direct des pailles, bien que celles-ci paraissent laisser moins de résidus humiques stabilisés, lorsqu'elles sont enfouies en nature que lorsqu'elles sont transformées en fumier (environ 200 kg de résidus humiques au lieu de 300 par tonne de matière organique de paille après quelques années d'enfouissement).

Cette troisième partie, fait non seulement la liaison entre les deux premières mais elle permet également de les compléter, puisqu'elle traite des conséquences culturales de l'enfouissement des pailles.

Dans la pratique, les conditions de réussite de l'enfouissement des pailles, correspondent à celles mises en évidence au laboratoire dans l'étude scientifique de la question ; ce sont également les mêmes que celles qui favorisent l'activité des microorganismes spécialisés dans la dégradation des pailles. Pour tirer le meilleur parti de l'enfouissement de ses pailles, l'agriculteur aura donc intérêt à se placer dans des conditions favorables à l'activité des bactéries aérobies cellulolytiques et des champignons cellulolytiques qui sont les principaux agents actifs dans la décomposition des pailles.

Cependant, certains facteurs ne dépendent pas de lui : ce sont les facteurs climatiques dont le rôle est néanmoins très important ; ils règlent en effet la vitesse de décomposition, laquelle peut être variable suivant les années pour une même région et suivant les régions pour une même année. Ils suffisent souvent à expliquer les différents résultats obtenus au champ. Un excès d'humidité, par exemple, gênera les microorganismes actifs qui sont en majorité aérobies. Par contre, un manque d'eau sera tout aussi néfaste puisqu'il empêche le développement des microorganismes en général. On s'explique ainsi les résultats médiocres obtenus en Afrique du Nord où il pleut très peu et où les pluies, de plus, sont mal réparties. Des températures fraîches ralentiront la décomposition sans l'entraver, des températures chaudes l'accélèreront au contraire, en favorisant l'activité des bactéries cellulolytiques aérobies.

Pour les autres conditions, l'agriculteur peut intervenir. Il a intérêt à bien travailler son sol, à lui donner une bonne structure afin de faciliter le travail de la microflore aérobie.

Le pH du sol joue également un rôle important, notamment pour les bactéries cellulolytiques aérobies dont l'optimum d'activité se situe en milieu neutre ou légèrement alcalin.

Quant aux champignons, ils s'adaptent mieux puisque les limites de pH tolérées sont comprises entre 3,5 et 8. Pour faire un enfouissement

de pailles dans des sols acides, l'agriculteur devra modifier le pH, sinon seuls les champignons seraient actifs.

L'agriculteur devra également satisfaire les besoins nutritifs de la microflore cellulolytique. Pour des terres vraiment très pauvres en phosphore et potassium, il faut envisager des apports de ces éléments pour accélérer la décomposition. Quant à l'azote, il est nécessaire d'en ajouter pour satisfaire les besoins des bactéries et champignons cellulolytiques : c'est une des conditions essentielles de réussite de l'enfouissement des pailles.

L'agriculteur qui tiendra compte de toute ces précautions, verra la fertilité de ses terres augmenter par suite d'un accroissement de leur taux d'humus stable. En effet, c'est grâce à cette microflore spécialisée qu'est franchie l'étape intermédiaire entre les pailles telles qu'on les apporte et l'humus stabilisé du sol. Par étapes successives se fait la dégradation des différents constituants et à partir de produits résistants à la décomposition, il y a synthèse d'autres corps, points de départ des matières humiques.

L'enfouissement des pailles n'est qu'un exemple, parmi de nombreux autres, des rapports qui existent entre la plupart des processus agronomiques et la microflore du sol.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

A l'origine de notre travail est un problème pratique. En effet, depuis quelques décades, les agriculteurs ont tendance à négliger les apports de matière organique dans leurs sols et la fertilité de leurs terres décroît peu à peu. Cette diminution, encore faible bien souvent, n'est pas catastrophique mais elle risque de le devenir, si l'on prolonge un tel système d'exploitation. Certaines personnes se sont alors inquiétées de ce problème et une véritable croisade pour l'humus a été lancée. Il fallait trouver une solution, à la fois simple et économique, pour remédier à l'appauvrissement des sols en matières humiques. On a alors pensé aux pailles, laissées dans les champs après le passage de la moissonneuse-batteuse.

Doit-on conseiller aux agriculteurs l'enfouissement direct de leurs pailles ? Cette pratique leur apportera-t-elle tous les résultats attendus, et en particulier pourra-t-elle maintenir et même accroître dans un avenir relativement proche, le taux d'humus de leurs sols ? Voilà en somme les problèmes qui ont guidé notre travail.

Le but pratique de notre travail ne peut être atteint qu'après avoir fait une étude théorique de la question, afin de mieux dissocier les différents facteurs dont doit dépendre la réussite de cette pratique culturale.

Ensuite, en nous plaçant dans des conditions favorables, nous pourrons voir si cet enfouissement de pailles apporte une solution au problème envisagé.

La première partie de notre travail est donc consacrée à des expériences de laboratoire.

Des essais théoriques nous permettent de fixer la *dose d'azote* ammoniacal qu'il faut apporter en même temps que la paille pour éviter un effet dépressif sur les cultures, elle est de l'ordre de 12 kg d'azote par tonne de paille enfouie. La connaissance de cette dose permettra alors d'éviter bien des résultats médiocres obtenus fréquemment autrefois. L'agriculteur n'a d'ailleurs pas intérêt à diminuer cette quantité ; en effet, l'azote qu'il ajoute en même temps que la paille ne se perd pas. Il est simplement immobilisé, à l'état d'azote organique microbien, au début de l'enfouissement. Cet azote se minéralisera ultérieurement quand la décomposition de la paille sera bien avancée, et il servira alors à l'alimentation des cultures.

D'autre part, ces études au laboratoire permettent de comparer entre elles les *différentes formes d'azote* minéral et de constater une identité de consommation des microorganismes pour les formes nitrique et ammoniacale. Il y aurait cependant, au début de l'enfouissement, une préférence des microorganismes pour l'azote ammoniacal et la décomposition de la paille serait plus rapide ainsi qu'en témoignent les mesures de gaz carbonique dégagé. Cette préférence disparaîtrait ensuite.

L'*azote organique* du foin de luzerne donne des résultats identiques à l'azote ammoniacal, aussi, peut-on enfouir, avec assurance de succès, la paille et une légumineuse. Cette dernière fournira son azote pour la décomposition de la paille et en même temps elle entretiendra un milieu humide, favorable à cette décomposition.

Ces essais, au laboratoire, permettent également de déterminer les conditions optima d'attaque des pailles par les microorganismes.

La nature du sol, son *taux d'argile, son aération* influencent cette dégradation qui est maximum dans un sol bien aéré, moyennement argileux.

La *température* et *l'humidité* sont aussi deux facteurs très importants qui règlent la décomposition des pailles, malheureusement l'agriculteur ne peut pas les modifier, aussi on s'explique que dans certaines régions, trop sèches, l'enfouissement direct de pailles ne donne pas des résultats satisfaisants.

L'humidité est certainement le facteur essentiel, car sans eau, la paille ne se dégradera pas. Par contre, des températures même basses, permettront le commencement de la décomposition de la paille.

Le *pH* des sols joue également un rôle important. La décomposition de la paille, ralentie en milieu acide, augmente au fur et à mesure que le pH s'élève, et à partir de 7,3-7,5, elle demeure stationnaire.

Les sols même pauvres, sont suffisamment pourvus en *acide phospohrique et potasse*, pour assurer la dégradation des pailles ; toutefois, des apports d'engrais accélèrent l'attaque.

Étant donné le rôle important joué par les microorganismes dans la décomposition de ces pailles, *la seconde partie* de notre travail est consacrée à une étude microbiologique de la question.

Quelle est l'influence, sur la microflore d'un sol, d'un enfouissement de paille fait en présence de plusieurs doses d'azote ammoniacal ? L'activité de certains microorganismes est-elle modifiée après cet apport de matières organiques ? Toutes ces questions nous ont préoccupé au cours de cette étude.

En premier lieu, cette pratique culturale entraîne une stimulation de *l'activité de la microflore totale* ainsi que nous pouvons nous en rendre compte par des mesures de gaz carbonique dégagé. Elle provoque également une *augmentation du nombre des microorganismes* et nous avons pu mettre en évidence les relations qui existent presque toujours entre le nombre et l'activité des microorganismes. L'effet des pailles sur la microflore totale est immédiat. Dès les premiers jours qui suivent l'enfouissement, nous constatons un maximum très net pour l'activité ainsi que pour la numération, puis, peu à peu, l'effet diminue mais il reste encore bien marqué, huit mois après l'apport de pailles dans le sol.

L'enfouissement de pailles provoque également une *stimulation de l'activité de certains microorganismes*. Ceux du cycle de l'azote, fixateurs, ammonifiants, et nitrificateurs ne sont pas influencés par des apports de paille, même en présence de fortes doses d'azote ammoniacal dans le milieu, tout au moins avec la terre que nous avons utilisée.

Par contre, certains microorganismes du cycle du carbone voient leur activité fortement stimulée. Ce sont les bactéries cellulolytiques aérobies et les champignons cellulolytiques, pour lesquels la paille constitue une excellente source d'aliments énergétiques. L'addition d'azote ammoniacal favorise leur développement. Ces microorganismes jouent un rôle très important dans la décomposition des pailles : leurs actions se chevauchent, se complètent et, par une suite de réactions en chaînes, la paille passe de sa forme initiale à un état voisin de ce qu'on appelle « matières humiques «. Ce sont d'abord les champignons et les bactéries qui commencent l'attaque de la paille, puis l'activité des champignons se ralentit ; elle reprend ensuite vers le 7^e^ mois. Pendant ce temps, les bactéries ont continué la dégradation de la paille, sans faiblir : nous avons simplement constaté, après un mois d'incubation des essais à 28°, le remplacement des *Cellfalcicula* par des *Cytophaga*.

Les bactéries cellulolytiques anaérobies ont un rôle peu important.

Les conséquences culturales de l'enfouissement des pailles, étudiées dans la *troisième partie* de notre travail, permettent de relier entre elles les deux

premières parties. En effet, les conditions optima de décomposition des pailles, définies dans la première partie correspondent à celles qui assurent le développement optimum des bactéries cellulolytiques aérobies et des champignons cellulolytiques, très actifs lors des apports de paille.

L'enfouissement de pailles sera profitable à l'agriculteur qui tiendra compte de toutes ces conditions. En effet, outre une augmentation du taux d'humus des sols, suffisante pour qu'on puisse conseiller cette pratique culturale, la paille permet également un accroissement de la fertilité des sols dans l'immédiat en élevant le plafond d'utilisation de l'azote. De plus, l'azote immobilisé par les microorganismes lors de sa décomposition, est libéré progressivement et permet ainsi un approvisionnement échelonné des cultures, l'année de l'enfouissement, ou les années suivantes.

RÉSUMÉ

L'enfouissement des pailles dans le sol.
Etude générale et répercussions sur la microflore du sol.

Doit-on conseiller l'enfouissement direct des pailles? Y a-t-il certaines précautions à prendre pour obtenir de bons résultats? L'agriculteur tirera-t-il du profit de cette technique culturale? La réponse à ces différentes questions constitue l'essentiel de notre travail.

Première partie : Étude in vitro de l'enfouissement des pailles.

Différents points ont été examinés dans cette partie :

— la détermination de la dose d'azote à apporter lors de l'enfouissement des pailles pour éviter un effet dépressif, le comportement de cet azote immobilisé temporairement au début de l'enfouissement ;

— la nature de l'azote à ajouter : comparaisons entre l'azote ammoniacal, l'azote nitrique et l'azote organique ;

— l'influence de différents facteurs physiques (nature du sol, taux d'argile, aération, pH...) et chimiques (acide phosphorique, potasse du sol, teneur en azote des pailles) sur la réussite de cette technique culturale.

Deuxième partie : Influence de cet enfouissement sur la vie microbienne dans le sol.

L'apport de pailles dans un sol entraîne une stimulation de l'activité de la microflore totale, ainsi qu'un accroissement du nombre de microorganismes, encore sensible huit mois après l'enfouissement.

Les différents groupes de microorganismes du cycle de l'azote ne sont pas influencés par des apports de paille : il n'en est pas de même de ceux du cycle du carbone : bactéries et champignons cellulolytiques dont les actions se complètent ; la paille passe alors, à la suite de dégradations en chaînes, de sa forme initiale à un état voisin de ce qu'on appelle les « matières humiques ».

Troisième partie : Expériences en serres.

Ces expériences en vases de végétation, intermédiaires entre les essais théoriques au laboratoire et les applications pratiques, nous renseignent sur la décomposition de la paille et permettent de comparer celle-ci à d'autres matières

organiques susceptibles d'être enfouies dans le sol (foin, fumier, sciure, tourbe, lignine...).

Nous retrouvons ainsi ce que les expériences au laboratoire pouvaient laisser prévoir : symptômes de carence pour les cultures concurrencées par les microorganismes lors des enfouissements de matière organique, arrière-action favorable de ces enfouissements, réponses variables des différentes matières organiques suivant leur constitution chimique.

SUMMARY

The incorporation of straw in soil.
A general study, and effects on the soil microflora.

This paper is intended to provide answers to such questions as to whether the direct incorporation of straw is advisable, whether certain precautions are required for good results, and if there is any advantage to the farmer from this cultural technique.

First part : In vitro *study of the incorporation of straw.*

Determinations were made of :

1. The amounts of nitrogen to be applied for preventing the depressing effects of straw incorporation, and the behaviour of nitrogen temporarily immobilized following the incorporation.

2. The kind of nitrogen to be used, comparing the ammonia, nitrate and organic forms of nitrogen.

3. The effects of physical factors (type of soil, clay content, aeration, pH, etc.) and chemical properties (soil phosphorus and potassium, nitrogen content of straw) on the ultimate results of this cultural technique.

Second part : *The effect of straw incorporation on soil micro-organisms.*

The application of straw to the soil stimulates the activity of the total microflora, and results in an increase of microbial populations still quite discernible eight months after the incorporation.

The different groups of micro-organisms of the nitrogen cycle are unaffected by the application of straw ; organisms of the carbon cycle, on the other hand, and the activity of cellulose-decomposing bacteria and fungi are affected, and the straw undergoes a progressive degradation and changes from its initial form into a substance similar to humic matter.

Third part : *glasshouse experiments.*

The pot experiments, representing an intermediate stage between theoretical tests in the laboratory and practical applications in the field provide information on the decomposition of straw, and make a comparison with other organic material suitable for the incorporation in soil (hay, manure, sawdust, peat, lignin, etc.) possible.

These experiments confirmed the findings of laboratory trials : deficiency symptoms in plants due to microbial competition following the incorporation of organic matter, good residual action of incorporated material, and variable behaviour of organic materials according to their chemical composition.

ZUSAMMENFASSUNG

Strohdüngung des Bodens.
Allgemeine Betrachtungen sowie Rückwirkungen auf die Mikroflora des Bodens.

Ist direkte Stroheinbringung anzuraten? Sind gewisse Vorsichtsmassnahmen zu treffen um gute Resultate zu erzielen? Zieht der Landwirt Nutzen aus einer solchen Kulturtechnik? Die Beantwortung dieser verschiedenen Fragen stellt den Hauptteil unserer Arbeit dar.

Erster Teil : Laboruntersuchungen über das Einbringen von Stroh.

In diesem Teil werden verschiedene Punkte untersucht :

— die Bestimmung der, bei Strohdungüng, beizufügenden Stickstoffgaben um jegliche Depression zu vermeiden ; das Verhalten dieses zeitweilig festgelegten Stickstoffes zu Beginn des Einbringens.

— die zu verwendenden Stickstoffsformen : Vergleich zwischen ammoniakalischem, salpetersaurem und organischem Stickstoff.

— die Einwirkung der verschiedenen physikalischen (Bodenart, Tongehalt, Bodenlüftung, pH...) und chemischen Bodenfaktoren (Phosphorsäure, Bodenkali, Stickstoffgehalt des Strohes...) in Bezug eines Gelingens dieser Kulturtechnik.

Zweiter Teil : Einfluss dieses Einbringens auf das Mikrobenleben des Bodens.

Eine Strohzufuhr bewirkt im Boden eine Anregung der Aktivität der gesamten Mikroflora sowie eine Zunahme der Mikroorganismenanzahl welche noch, acht Monate nach dem Unterbringen spürbar ist.

Die verschiedenen Gruppen von Mikroorganismen des Stickstoffkreislaufes werden durch eine Strohzufuhr nicht beeinflusst. Dieselben des Kohlenstoffkreislaufes hingegen, weisen ein anderartiges Betragen auf : durch die Bakterien und zelluloseabbauenden Pilze deren Tätigkeiten sich ergänzen, wird das Stroh, infolge eines stufenweisen Abbaues, von seinem ursprünglichen Zustand in eine, den « Humusstoffen » verwandte Form überführt.

Dritter Teil : Treibhausexperimente.

Diese Vegetationsgefässversuche, die das Zwischenglied zwischen theoretischen Laborexperimenten und praktischer Anwendung bilden, geben uns Aufschluss über die Zersetzung des Strohes, und erlauben, dieselbe mit derjenigen anderer organischen Materien die sich als Bodenbeigaben eignen (Heu, Stallmist, Sägemehl, Torf, Lignin...) zu vergleichen.

Es bestätigt sich hierdurch was die Laborexperimente voraussehen liessen : Mangelsymptome für diejenigen Kulturen welche bei Zufuhr von organischer Materie durch die Mikroorganismen konkurrenziert werden ; günstige Nachwirkung dieser Zufuhren ; wechselndes Verhalten der verschiedenen organischen Materien je nach ihrer chemischen Beschaffenheit...

Запахивание соломы в почву. Общий очерк и влияние на почвенную микрофлору

M[me] Ж. СИМОН (Версаль).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Следует-ли советовать непосредственное запахивание соломы? Нужна-ли некоторая предосторожность, чтобы получить хорошие результаты? Получит ли пользу земледелец от этого технического приема? Ответ на эти различные вопросы является главной целью нашей работы.

Первая часть : Изучение запахивания соломы « in vitro ».

В этой части рассмотрены различные пункты :

— Определение количества азота, что следует вносить при запахивании соломы, чтоб избежать понижения урожая; поведение (= судьба) этого азота, временно принявшего неподвижную форму, в начале запахивания.

— В какой форме следует вносить азот : сравнение между аммиачным, нитратным и органическим азотом.

— Влияние различиых физических (природа почвы, содержание глины, аэрация, pH...) и химических факторов (фосфорная кислота, калий, содержание в соломе азота) на успех этой земледельческой техники.

Вторая часть : Влияние запахивания соломы на жизнь микробов в почве.

Внесение соломы в почву вызывает возбуждение активности всей микрофлоры, равно как и увеличение числа микроорганизмов, еще заметное восемь месяцев спустя после запахивания.

Различные группы микроорганизмов цикла азота не изменены внесением соломы. Но дело обстоит иначе с микробами цикла углерода : целлюлолитическими бактериями и грибами, которых действия взаимно пополняются; тогда солома, вследствие последовательных деградаций, переходит из своей первоначальной формы в состояние похожее на то, что обычно называют « гумус ».

Третья часть : Опыты в теплицах.

Эти опыты в вегетационных сосудах, занимающие среднее место между теоретическим изучением в лаборатории и практическим применением, позволяют нам иметь сведения относительно разложения соломы и сравнить ее с другими органическими веществами, которые могут также быть запаханы в почву (сено, навоз, опилки, торф, лигнин...).

Итак, мы встречаем то, что лабораторные опыты позволяли предвидеть : признаки голода культур, из-за конкуренции микроорганизмов при внесении органических веществ, благоприятное действие этих внесений впоследствии, действие неодинаковое этих веществ в зависимости от их химического состава.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

(1) Barbier (G.). — Le problème de l'humus dans les exploitations ayant abandonné l'élevage. *C. R. Ac. Agric.*, p. 526-530, 1943.
(2) André (G.). — *Chimie Agricole-Chimie Végétale*, 3e édition, p. 63.
(3) Scheffer (F.). — *VIe Congrès International Microbiologie*, Rome, III, S, 18, p. 891, 1953.
(4) Waksman (S. A.). — *Soil Microbiology*, p. 124, 1952.

(5) HENIN (S.) et DUPUIS (J.). — Bilan de la matière organique des sols, *Ann. Agr.*, p. 17-29, 1945.
(6) BARBIER (G.). — L'Humus, *Conférence Association Française pour l'Étude du sol*, janvier 1951.
(7) DROUINEAU (G.) et LEFEVRE (G.). — Première contribution à l'étude de l'N minéralisable dans les sols. *Ann. Agr.*, p. 518-536, 1949.
(8) DROUINEAU (G.) et GOUNY (P.). — Etude du dosage de l'azote nitrique par la méthode de DEVARDA. *Ann. Agr.*, p. 154-164, 1947.
(9) BRUNEL (A.). — *Chimie Végétale*, t. II, Imprimerie Georges Frères, 1948.
(10) ANSTETT (A.). — Adaptation de la méthode SCHOLLENBERGER-ANNE (dosage du C organique dans les sols) au dosage rapide du C organique dans les fumiers et végétaux. *Annales de l'Institut Agricole* d'Algérie, t. V, fasc. 10, 1^er^ juillet 1950.
(11) ANNE (P.). — Sur le dosage rapide du carbone organique des sols, *Ann. Agr.*, p. 161-172, 1945.
(12) Analyseur de Gaz, type 80, licence ONERA, en provenance du contrôle de chauffe.
(13) MACBETH (I. G.). — Ammonium fixation in soils, *Journal of Agricultural Research*, **9**, p. 141-155, 1917.
(14) ALLISON (F. E.), JANET, DOETSCH (J.) et ROLLER (E. M.). — Ammonium fixation and availability in Harpester clay loam, *Soil Science*, **72**, p. 187-100, 1951.
(15) BARBIER (G.). — Expérience non encore publiée.
(16) SYLVESTRE (G.), BOISCHOT (P.) et QUILLON (P.). — Fixation de l'azote minéral par les microorganismes décomposant les pailles de céréales dans le sol. *C. R. Ac. Sc.*, t. 232, p. 436-438, 29 janvier 1951.
(17) SOUBIES (L.), CADET (R.) et MAURY (P.). — La fertilisation des sols dans le Sud-Ouest (*publication de* l'Office National Industriel de l'Azote)
(18) WAKSMAN (S. A.) et STARKEY (R. L.). — Microbiological analysis of soils as an index of soil fertility. VII CO_2 évolution, *Soil Science*, **17**, p, 141-161, 1924.
SMITH (F. B.), BROWN (P. E.) et MILLAR (H. C.). — The rhytmical nature of microbiological activities in soils as indicated by the évolution of CO_2, *Journ. Am. Soc. Agr.*, **27**, p. 104-108, 1935.
APPLEYAR (A.) et RUSSELL (E. J.). — The atmosphere of the soil : its composition and the cause of variation, *Journ. Agric. Sci.*, v 7., p. 1-48, 1915
(19) ANDERSON (J.). — Influence de l'azote assimilable sur la fermentation de la cellulose dans le sol, *Soil Science*, **21**, p. 115-126, 1926.
(20) STARKEY (R. L.). — Some observations on the decomposition of organic matter in soils, *Soil Science*, **17**, p. 293-314, 1929.
(21) GOODING (T. H.) et Mac CALLA (T. M.). — Loss of carbon dioxide and ammonia from crop residues during décomposition, *Soil Science Society of America* proceedings, p. 185,-190, 1945.
(22) MILLAR (H. C.), SMITH (F. B.) et BROWN (P. E.). — The rate of decomposition of various plant material in soils, *Journal of the American Society of Agronomy*, **28**, p. 914-923, 1926.
(23) BREMNER (J. M.) et LEES (H.). — Studies of soil organic matter. II. The extraction of organic matter from soil by neutral reagents, *J. Agric. Sci.*, **39**, p. 274-279, 1949.
(24) Expériences de GERRETSEN (F. C.) et WAKSMAN données dans *Soil Microbiology* de WAKSMAN S. A., John Wiley et Sons, New-York, 1952.
(25) POCHON (J.) et BARJAC (H.) De. — *Traité de Microbiologie des Sols.* Applications Agronomiques, (Masson) 1958.
(26) HENIN (St.) et TURC (L.). — Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *C. R. Ac. Agr.*, **35**, p. 41,-44 1949.
(27) LEFÈVRE (G.) et M^me^ BLANC AICARD (S.). — Le problème de l'enfouisse-

ment des pailles et ses contingences pédoclimatiques. *Ann. Agr.*, p. 379-397, 1953.

(28) TRAAEN (A. E.). — Uber den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Stickstoff-umzetzungen in Erdboden, *Centbl. Bakt. Abt.*, **2**, V, 45, p. 119-135.

(29) RUSSEL (J. C.), JONES (E. G.) et BAHRT (G. M.). — The temperature and moisture factors in nitrate production. *Soil Science*, **19**, p. 381-398, 1925.

(30) « 42 parcelles ». (Champ d'expériences à Versailles)

(31) BOISCHOT (P.) et BARBIER (G.). — Notes sur le fumier artificiel et quelques autres sources d'humus, *Ann. Agr.*, p. 562-569, 1948.

(32) BOISCHOT (P.) et SYLVESTRE (G.). — Fixation de l'azote nitrique par les micro-organismes décomposant les pailles de céréales dans le sol, *C. R. Ac. Sc.*, **1**, p. 2253, 1951.

(33) RICHARD (E. M.) et SHRIKHANDE (J. G.). — The preferential utilization of different forms of inorganic nitrogen in the decomposition of plant materials, *Soil Science*, **39**, p. 1 à 8, 1935.

(34) JANSSON (S. L.), HALLAM (M. J.) et BARTHOLOMEW (W. V.). — Preferential utilization of ammonium over nitrate by microorganisms in the décomposition of soil organic matter, *Plant and Soil*, **6**, p. 382-390, 1955.

(35) BODEA (C.) et MURESANU (P. L.). — Décomposition of cellulose in soil in relation to the form of nitrogcn, *An. Fac. Agron. Chy.*, **11**, p. 169-178, 1946.

(36) GROH (W.). — Die Deutsche Landwirtschaft, n° 1, 1948.

(37) DECOUX (L.). — Paille, humus et mécanisation. *Extrait des publications de l'Institut Belge agricole de la Betterave* n° 6, 1950.

(38) HUTCHINSON (H. B.) et RICHARDS (E. H.). — Artificial farmyard manure. *Journ. Min. Agr.* Great Britain, **28**, p. 398-411, 1921.

(39) WAKSMAN (S. A.) et TENNEY (F. G.). — The composition of naturaı organic materials and their decomposition in the soil. II. Influence of age of plant upon the rapidity and nature of its decomposition-rye plants, *Soil Science*, **24**, p. 317-333, 1927.

(40) LEMMERMANN (O.), JESSEN (W.) et ENGEL (H.). — Die Bedeutung des Kohlenstoff stickstoff Verhältnisses und anderer chemischen Eigenschaften der organischen Stoffe für ihre Wirkung. *Zeitschr. f. Pflanzenernähr. Düng. und Bodenk.* A. 17, p. 321-355, 1930.

(41) POCHON (J.). — *Manuel technique d'analyse microbiologique des sols*, Masson. 1954

MAC CRADY. — Table donnée dans le livre de J. Pochon. p 35

(42) WINOGRADSKY (S.). — *Microbiologie du Sol*, (Masson). 1949

(43) MARTIN JAMES (F.). — Use of acid rose bengal and streptomycine in the plate method for estimating soil fungi, *Soil Science*, **69**, p. 215-232, 1950.

(44) SIMON-SYLVESTRE (G.). — Influence de l'enfouissement des pailles sur l'activité biologique globale d'un sol. *C. R. Ac. Sc.*, n° 11, 17 mars 1958.

(45) BARJAC (H. de) et POCHON (J.). — Titrage du pouvoir ammonifiant de la microflore des sols, *Ann. Institut Pasteur*, **85**, p. 82-89 (méthode modifiée par M^lle^ CHALVIGNAC) 1953.

(46) ALLISON (F. E.). — Assimilation des nitrates par les microorganismes du sol en relation avec les apports d'énergie assimilable. *Soil Science*, **24**, p. 79-91, 1927.

(47) COPPIER (O.) et BARJAC (H. De). — De la richesse d'un sol en microorganismes nitrificateurs. *Ann. Inst. Pasteur*, **83**, p. 118,-125 1952.

(48) MURRAY (J. J.). — Influence de la paille sur les processus biologiques du sol, *Soil Science*, **12**, p. 233-259, 1921.

(49) SIMON-SYLVESTRE (G.). — Enfouissement de paille et développement des bactéries cellulolytiques aérobies dans le sol, *C. R. Ac. Sc.*, n° 12, 24 mars 1958.

(50) VERONA (O.). — Activity of cellulosolytic microbes of soils. *Agr. Ital.* (Pisa), **49**, p. 153-155, 1949.
(51) BAKERSPIEGEL (A.) et MILLER (J. J.). — Comparaison of oxgall, crystal violet, streptomycin and penicillin as bacterial growth inhibitors in platings of soil fungi, *Soil Science*, **76**, p. 123-126, 1953.
(52) JENSEN (H. L.). — Contributions to the microbiology of australian soils. The activity of microrganisms in the decomposition of organic matter. *Proceed. of the linean society of New South Wales*, **61**, p. 27-55, 1936.
(53) HENDERSON (M. E. K.) et FARMER (V. C.). — *J. Gener. Microbio.*, **12**, 37, 1955.
(54) MARTIN (F.) et THOMAS (L.). — Decomposition studies of alfalfa and sweet clover roots and straw, *Soil Science*, **24**, p. 309-316, 1927.
(55) WAKSMAN (S. A.). — The importance of mold action in the soil, *Soil Science*, vol. 6, p. 137-155, 1915.
(56) BARJAC (H. De) et CHALVIGNAC (M. A.). — Nouvel essai sur la détermination du pouvoir amylolytique. *Ann. Inst. Pasteur*, **87**, p. 84,-89 1954.
(57) ALARIE (A. M.) et GRAY (P. H. H.). — Aerobie bacteria that decompose cellulose isolated from Quebec soils, Isolation and description of the species. *Canad. Journ. of research*. C., **25**, p. 228-241, 1947.
(58) DEMOLON (A.) et BURGEVIN (H.). — Sur l'enfouissement des pailles de céréales dans le sol et ses répercussions. *Ann. Agr.*, p. 357-365, 1940.
(59) BARBIER (G.) et BOISCHOT (P.). — Influence des fumures organiques et notamment de la paille enfouie en nature sur l'efficacité de l'azote minéral. *Ann. Agr.*, p 570-573, 1950.
(60) BARBIER (G.). — Action des fumures organiques sur l'utilisation de l'azote minéral par la betterave, *Ann. Agr.*, p. 582, 1952.
(61) BARBIER (G.) et BOISCHOT (P.). — Cinq années d'expériences sur la fumure à la paille. *C. R. Ac. Agr.*, **40**, p. 43-39, 1954.
(62) SYLVESTRE (G.) et BOISCHOT (P.). — Fixation de l'azote minéral par les microorganismes au cours de la décomposition des matières organiques dans le sol, *C. R. Ac. Sc.*, t. 297, p. 95-97, 1953.
(63) PICHARD (M.). — Méthode d'analyse des pailles et des fumiers, *Rapport I. R. A.*, p. 228-231, 1929.
(64) ALLISON (F. E.) et ANDERSON (M. S.). — Emploi de la sciure pour mulch et amélioration du sol, *circulaire n°* 891, nov. 1951, Washington, United states department of Agriculture.
(65) WAKSMAN (S. A.) et TENNEY (F. G.). — On the origin and nature of the soil organic matter or soil « humus », IV. The decomposition of the various ingredients of straw and of alfalfa meal by mixed and pure cultures of micro-organisms. *Soil Science*, **22**, p. 395-406, 1926.
(66) BARBIER (G.). — Humus et fertilité, *Cahier des Ingénieurs Agronomes*, nos 47-48, p. 20-22, 1949.

NOTES ANALYTIQUES

546. 18 : 545

SUR LE DOSAGE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE DANS LES SOLS

PAR

C. BOUVATTIER
Station Agronomique, Nantes.

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Introduction.

II. — Détermination de l'acide phosphorique dans l'extrait citrique (acide phosphorique « assimilable »).
Utilisation du chlorure stanneux comme réducteur.
Utilisation de l'acide ascorbique comme réducteur.

III. — Détermination d'une abaque pour l'interprétation des méthodes rapides.
Barbier-Morgan.
Dupuis.
Indice D. B. M.

I. — Introduction.

La nécessité d'effectuer les analyses en grandes séries nous a conduit à apporter aux méthodes classiques quelques légères modifications. L'exposé de ces modifications fait l'objet du présent mémoire. Les seuls buts visés dans la mise au point des méthodes ont été :

1° La mise en évidence rapide de l'acide phosphorique contenu dans l'extrait citrique des terres. En effet, la méthode SCHEFFER-LORENTZ que nous avons employée jusqu'ici est longue.

Nous avons donc recherché une méthode qui, plus rapide, soit, en même temps, aussi précise et nous avons été conduit à adopter la réaction céruléo-molybdique de DENIGÈS (1) avec quelques variantes pour tenir compte de l'acidité du milieu et pour éliminer l'inconvénient des réducteurs instables.

2° L'obtention d'une concordance aussi régulière que possible entre les résultats obtenus avec la méthode DYER (acide citrique à 2 p. 100) et les méthodes rapides qui se prêtent tout particulièrement aux analyses en grandes séries.

Les résultats obtenus avec la méthode BARBIER-MORGAN sur les terres

schisteuses de notre région montrent une très faible solubilité de l'acide phosphorique dans le réactif acéto-acétique : une terre moyenne qui a 0,20 à 0,25 g/kg d'acide phosphorique assimilable a très généralement un indice BARBIER-MORGAN d'acide phosphorique compris entre 2 et 4 (mg/l de solution). Dans ces conditions, il est difficile de distinguer les terres moyennement pourvues en acide phosphorique des terres pauvres ou très pauvres.

Nous avons donc été amené à employer parallèlement à la méthode BARBIER-MORGAN, une autre méthode rapide, celle mise au point par DUPUIS (2).

Nous basant sur des comparaisons nombreuses faites en utilisant simultanément les trois méthodes : DYER, BARBIER-MORGAN et DUPUIS, nous avons établi des abaques nous permettant d'obtenir à l'aide des deux méthodes rapides un indice (que nous avons appelé « indice D. B. M. ») qui présente avec l'acide phosphorique assimilable une concordance suffisante pour nous permettre d'utiliser dans nos conseils de fumure la même interprétation que celle adoptée pour l'acide phosphorique assimilable par les stations agronomiques françaises (3).

Le présent mémoire aura donc deux parties :

a) Mise au point de méthodes de détermination de l'acide phosphorique contenu dans l'extrait citrique des terres.

b) Mise au point d'un indice d'acide phosphorique permettant d'interpréter les résultats d'analyses rapides des terres en utilisant la bonne corrélation qui existe entre l'expérience culturale et les quantités d'acide phosphorique assimilable contenues dans les sols d'expériences.

II. — Mise en évidence de l'acide phosphorique dans l'extrait citrique.

1° Réduction par le chlorure stanneux.

Nous utilisons couramment la réduction céruléo-molybdique pour mettre en évidence l'acide phosphorique contenu dans les extraits BARBIER-MORGAN ou DUPUIS pour lesquels elle nous donne satisfaction. L'instabilité du chlorure stanneux en solution est un inconvénient parce que cela nécessite une pesée chaque fois que l'on veut faire un dosage. Nous avons partiellement éliminé cet inconvénient en utilisant le chlorure stanneux sous la forme d'une solution à 40 p. 100 dans l'acide chlorhydrique concentré conservée à basse température comme l'indiquent DUCET et MENCL dans une de leurs publications (4). Cela nous évite la pesée chaque fois que nous avons un dosage à faire : nous nous bornons à mesurer 0,2 ml de la solution concentrée dans 50 ml d'eau. La solution concentrée se conserve 15 jours au réfrigérateur sans altération sensible.

Partant de la méthode DENIGÈS pour le dosage de l'acide phosphorique par la réaction céruléo-molybdique, nous nous sommes contenté de choisir l'acidité et la concentration des réactifs de façon à obtenir une échelle de teintes et un volume final bien adaptés à nos conditions de travail.

Nous utilisons, en effet, le photocolorimètre de JOBIN et YVON avec des tubes à essai calibrés de 5 ml de capacité.

Nous prélevons 1 ml de l'extrait citrique (dilué si la terre contient plus de 0,15 p. 1000 d'acide phosphorique).

Nous ajoutons 3 ml de réactif sulfomolybdique obtenu en dissolvant 10 g de molybdate d'ammonium dans un litre d'acide sulfurique 2 N/3.

Après mélange, nous ajoutons 1 ml de la solution de chlorure stanneux

préparé comme il est indiqué ci-dessus. Nous homogénéisons et nous attendons 1/4 d'heure pour faire la lecture au photocolorimètre avec le filtre de 650 mμ de longueur d'onde.

Les résultats comparés à ceux de la méthode SCHEFFER-LORENTZ sont donnés dans les deux premières colonnes du tableau I ci-dessous pour dix terres prises au hasard.

TABLEAU I

Comparaison des méthodes de dosage de l'acide phosphorique dans l'extrait citrique (en g d'acide phosphorique par kg de terre).

Méthode Scheffer-Lorentz	Chlorure stanneux	Acide ascorbique
0,09	0,10	0,10
1.11	1,12	1,08
0,65	0,65	0,65
0,02	0,03	0,03
0,14	0,13	0,14
0,13	0,13	0,13
0,04	0,03	0,04
0,31	0,31	0,30
0,20	0,21	0,20
1,88	1,96	1,84

Des quantités connues d'acide phosphorique ont été ajoutées aux extraits de terres pour vérifier la précision de la méthode. Les résultats sont rassemblés dans le tableau II ci-dessous :

TABLEAU II

Quantité dosée dans l'extrait en mg/l	Quantité ajoutée : 4 mg/l				Quantité ajoutée : 40 mg/l			
	Quantité théorique	Quantité retrouvée	Erreur absolue	% erreur relative	Quantité théorique	Quantité retrouvée	Erreur absolue	% erreur relative
9,0	13,0	12,8	— 0,2	1,5	49,0	46,8	— 2,2	4,5
54,0	58,0	58,0	0	0	94,0	93,0	— 1,0	1,1
52,0	56,0	56,8	+ 0,8	1,4	92,0	92,0	0	0
20,2	24,2	25,0	+ 0,8	3,3	60,2	60,8	+ 0,6	1,0
18,0	22,0	23,0	+ 1,0	4,6	58,0	59,4	+ 1,4	2,4
3,2	7,2	7,0	— 0,2	2,8	43,2	42,8	— 0,4	0,9
2,6	6,6	6,2	— 0,4	6,1	42,6	41,8	— 0,8	1,9
10,6	14,6	14,4	— 0,2	1,4	50,6	52,0	+ 1,4	2,8
83,0	87,0	85,4	— 1,6	1,8	123,0	122,0	— 1,0	0,8
18,6	22,6	23,2	+ 0,6	2,6	58,6	57,0	— 1,6	2,7

On voit que la méthode est suffisamment précise puisque les quantités d'acide phosphorique ajoutées sont retrouvées avec une erreur absolue qui, les résultats étant exprimés en g par kg de terre (dilution au 1/5), ne porte que sur la troisième décimale ou, rarement, sur une unité de la seconde. L'erreur relative reste toujours dans des limites acceptables.

Un des principaux inconvénients du chlorure stanneux est le manque de stabilité de l'intensité de la couleur. Celle-ci croît d'abord rapidement pendant les premières minutes, puis moins rapidement. La courbe d'absorption présente ensuite un palier situé entre un quart d'heure et une heure après la fin de la réaction, palier pendant la durée duquel la lecture doit être faite. Ensuite l'intensité de la couleur décroît lentement.

L'inconvénient de cette instabilité de l'intensité de teinte est limitée lorsqu'on réalise, simultanément au dosage, une gamme de comparaison. C'est ce que nous faisons pour chaque série de dosages. Deux points nous suffisent, du reste, pour préciser au photocolorimètre la droite d'étalonnage.

Nous utilisons la gamme dans les limites d'acide phosphorique comprises entre 0 et 0,15 p. 1000 de terre. Dans cet intervalle, la loi de BEER est vérifiée.

2° Réduction par l'acide ascorbique.

Cherchant à éliminer les inconvénients que présente l'emploi du chlorure stanneux comme réducteur, nous avons été conduit à essayer d'autres réducteurs. La plupart (cuivre, hydroquinone, hyposulfite de sodium, sulfate ferreux) présentent autant d'inconvénients et quelquefois plus.

Une étude de JEAN (5) sur le dosage colorimétrique du phosphore et du silicium, nous a conduit à essayer l'acide ascorbique comme réducteur et nous avons constaté qu'il ne présentait pas les inconvénients du chlorure stanneux. Ainsi :

a) Nous avons conservé cinq mois les réactifs à la lumière dans des flacons blancs à moitié pleins sans qu'ils s'altèrent sensiblement. Les gammes effectuées au moyen de ces réactifs indiquaient des densités optiques tout à fait comparables, comme le montre le tableau suivant :

TABLEAU III

Mg de P_2O_5 par litre de solution	Densités optiques lues (filtre 700 mμ.)		
	25 novembre	7 janvier	15 avril
0	0,05	0,045	0,06
8	0,39	—	0,42
16	0,79	—	0,80
24	1,115	—	1,13
32	1,48	—	1,485
40	1,80	1,805	1,79

Ainsi, bien qu'en solution diluée (0,2 p. 100), l'acide ascorbique a conservé toutes ses propriétés. On observe seulement un léger jaunissement de la solution. Néanmoins, nous ne conservons pas plus de trois mois la solution.

b) Les intensités de coloration obtenues sont stables pendant plus de 48 heures. Le tableau IV ci-dessous, qui donne les densités optiques observées pour les mêmes échantillons à des temps différents, met ce fait en évidence.

La gamme est toujours reproductible comme le montre le tableau III pour trois gammes faites à des périodes différentes.

Nous avons donc adopté l'acide ascorbique comme réducteur ainsi que les réactifs employés par JEAN, à savoir :

— Réactif d'extraction et de dilution : acide citrique à 2 p. 100.

— Solution d'acide sulfurique 2 N.

— Solution de molybdate de sodium à 20 g/l (nous mélangeons ces deux solutions à volumes égaux).

— Solution d'acide ascorbique à 2 g/l.

— Solution d'orthophosphate disodique à 0,1513 g/l dans l'acide citrique à 2 p. 100 (1 ml représente 0,000030 g de P_2O_5).

Le mode opératoire que nous avons adopté nous permet d'utiliser directement les tubes calibrés du colorimètre et d'obtenir une variation de l'intensité de la teinte, dans l'intervalle compris entre les points extrêmes de la gamme pour

TABLEAU IV

Mg de P_2O_5 par litre de solution	Densités optiques lues			
	filtre 700 mμ			
	au temps 0	après 30 h.	après 48 h.	
0	0,04	0,04	0,04	
20	0,93	0,95	0,94	
40	1,74	1,76	1,76	
	filtre 650 mμ			
	au temps 0	après 30 h.	après 40 h.	après 54 h.
0	0,045	0,045	0,04	0,05
20	0,82	0,815	0,825	0,83
40	1,51	1,52	1,535	1,53

lequel la loi de BEER est vérifiée, de 1,2 unité de densité optique. Dans ces limites, les mesures que nous effectuons sont suffisamment précises puisque, pratiquement, nous sommes amenés à négliger les variations de la quantité d'acide phosphorique inférieures à 2 mg/l.

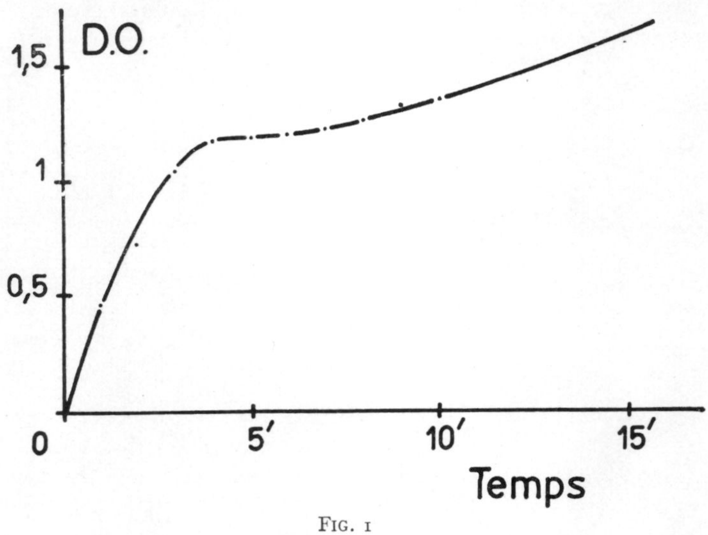


FIG. 1

Primitivement, nos essais ont été effectués avec le filtre de 700 mμ de longueur d'onde, mais nous avons finalement adopté le filtre de 650 mμ de longueur d'onde qui, du fait de sa plus grande luminosité, est plus sensible aux variations d'intensité lumineuse et nous permet plus de précision malgré une moins grande variation de la densité optique pour une même quantité d'acide phosphorique.

Nous opérons de la façon suivante :

— Prélever 1 ml de l'extrait citrique de terre (ou de sa dilution si la terre contient plus de 0,15 p. 1000 d'acide phosphorique assimilable).

— Ajouter 2 ml de réactif sulfomolybdique et agiter.

— Ajouter 1 ml de la solution d'acide ascorbique.

— Porter les tubes 5 minutes exactement au bain-marie, bouillant.

— Refroidir rapidement.

— Colorimétrer.

Des essais effectués pour nous rendre compte de l'influence du temps de chauffage nous ont montré, comme l'indique JEAN (5), que s'il est inférieur à 5 minutes, la coloration est incomplètement développée, mais qu'au-delà de 5 minutes, il y a risque de réduction du molybdate non combiné au phosphore, donc de coloration trop forte. La courbe obtenue pour l'intensité de coloration en fonction du temps de chauffage est celle de la figure 1 ci-dessus pour une quantité d'acide phosphorique correspondant à 0,15 p. 1000 de terre. Elle montre bien un point d'inflexion à 5 minutes.

Il est donc important de respecter de temps de chauffage pour se trouver toujours dans les mêmes conditions.

La méthode SCHEFFER-LORENTZ était prise comme méthode de comparaison, le tableau I montre que les résultats sont tout à fait comparables aux erreurs d'expérience près.

Comme pour le chlorure stanneux, nous avons fait des essais d'adjonction à l'extrait citrique des terres de quantités connues d'acide phosphorique. Les résultats que nous avons obtenus sont consignés dans le tableau V, ci-dessous.

Ces résultats nous permettent de constater la bonne précision de la méthode. En effet, la somme algébrique des erreurs absolues est voisine de zéro et la moyenne des erreurs relatives est de 1,95 p. 100 avec des erreurs maximum de 5,5 p. 100.

TABLEAU V

Quantité dosée dans l'extrait en mg/l	Acide phosphorique en P_2O_5							
	Quantité ajoutée : 4 mg/l				Quantité ajoutée : 40 mg/l			
	Quantité théorique	Quantité retrouvée	Erreur absolue	% erreur relative	Quantité théorique	Quantité retrouvée	Erreur absolue	% erreur relative
11,0	15,0	15,2	+ 0,2	1,3	51,0	50,4	— 0,6	1,2
18,6	22,6	22,6	0	0	58,6	60,4	+ 1,8	3,0
48,2	52,2	53,0	+ 0,8	1,5	88,2	88,0	— 0,2	0,3
10,8	14,8	14,6	— 0,2	1,3	50,8	49,0	— 1,8	3,5
7,8	11,8	11,6	— 0,2	1,7	47,8	47,0	— 0,8	1,7
5,8	9,8	9,4	— 0,4	4,1	45,8	46,2	+ 0,4	0,9
7,0	11,0	11,6	+ 0,6	5,5	47,0	48,8	+ 1,8	3,7
32,0	36,0	35,4	— 0,6	1,7	72,0	75,0	+ 3,0	4,2
174,0	178,0	177,0	— 1,0	0,6	214,0	211,0	— 3,0	1,4
96,4	10c,4	100,0	— 0,4	0,4	136,4	138,0	+ 1,4	1,0

III. — Interprétation des méthodes rapides.

Malgré la rapidité du dosage ainsi obtenue, la méthode DYER ne se prête pas aux analyses en grandes séries en raison de la nécessité d'agiter pendant deux fois quatre heures à seize heures d'intervalle.

Nous utilisons donc plus couramment les méthodes rapides.

La méthode BARBIER-MORGAN que nous avons utilisée seule pendant de nombreuses années présente, avec les terres de notre région, très pauvres en acide phosphorique rapidement assimilable, l'inconvénient de donner des indices très faibles pour des terres considérées comme moyennes avec la méthode DYER. Dans ces conditions, il est impossible de faire un classement des terres avec une échelle d'interprétation suffisamment étalée. En outre, nous n'avons pas assez de résultats expérimentaux concernant les réactions des cultures aux fumures qui leur sont apportées en fonction de l'indice BARBIER-MORGAN des terres pour pouvoir interpréter valablement la méthode BARBIER-MORGAN utilisée seule.

Des constatations avaient déjà été faites ici (6 et 7) qui montraient que la méthode BARBIER-MORGAN ne pouvait pas être interprétée dans notre région de terres sur schistes comme elle l'était dans les régions de terres de limons, par exemple.

Nous avons donc été conduit à utiliser, depuis cinq ans, la méthode DUPUIS (2) qui permet d'extraire des terres des quantités d'acide phosphorique plus en rapport avec la quantité extraite par la méthode DYER.

La comparaison des trois méthodes montre que le rapport des quantités extraites par la méthode DYER aux quantités extraites par la méthode BARBIER-MORGAN varie de 15 à 130 (rapport de 1 à 9) tandis que le rapport des quantités extraites par la méthode DYER aux quantités extraites par la méthode DUPUIS varie de 1 à 2 pour les terres acides. (DUPUIS précise bien que sa méthode n'est pas valable pour les terres à pH alcalin pour lesquelles l'acide phosphorique trouvé est proportionnellement plus faible par rapport à la méthode DYER, sans doute parce qu'une partie de l'acide chlorhydrique est utilisée pour la neutralisation du calcaire). Les indices donnés par la méthode DUPUIS permettent donc de se faire une idée plus juste de la valeur des terres du point de vue des conseils de fumure à donner.

Cependant, il n'y a pas une relation étroite entre la méthode DYER et la méthode DUPUIS et on observe des variations importantes, surtout pour les terres pauvres ou moyennes. Mais, en comparant les résultats des trois méthodes, nous avons été amené à constater qu'il y a une relation assez bonne entre les résultats qu'elles donnent.

Ainsi, l'emploi simultané des deux méthodes rapides peut nous permettre d'obtenir un indice commun que nous appelons indice D. B. M. (DUPUIS-BARBIER-MORGAN) qui présente une bonne concordance avec les résultats de la méthode DYER et permet de classer les terres très sensiblement de la même façon.

L'avantage de cette façon de faire est que nous pouvons utiliser pour les conseils de fumure les résultats expérimentaux obtenus à partir de la méthode DYER en dosant l'acide phosphorique par les méthodes rapides qui se prêtent au travail en grande série.

L'emploi simultané de la méthode DUPUIS et de la méthode BARBIER-MORGAN ne présente pas d'inconvénient et ne demande qu'un léger surcroît de travail puisque la méthode BARBIER-MORGAN est utilisée pour le dosage de la potasse. L'extraction est donc faite et il ne reste plus qu'à mettre en évidence l'acide phosphorique.

Nous avons reporté sur des axes rectangulaires les indices DUPUIS et BARBIER-MORGAN déterminés pour une même terre. Ceci nous a donné les coordonnées d'un point représentant la valeur de la terre en fonction des deux

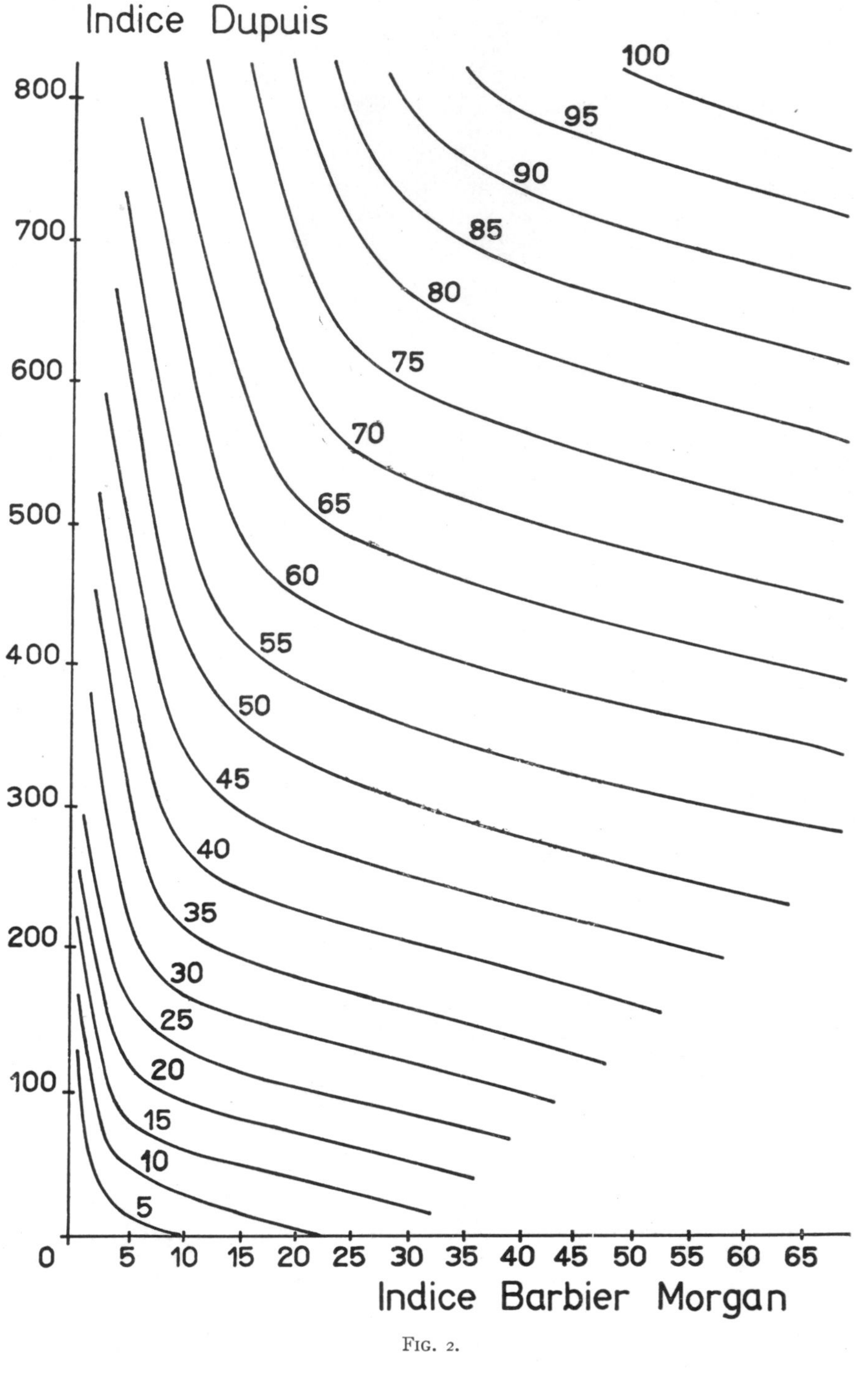

Indice Dupuis
800
700
600
500
400
300
200
100
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65
Indice Barbier Morgan
100
95
90
85
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5

FIG. 2.

méthodes rapides. L'acide phosphorique assimilable étant dosé simultanément pour chaque terre, nous avons constaté qu'en donnant à ce point la valeur ainsi trouvée, les points ayant même valeur se situaient généralement sur des courbes à allure hyperbolique.

Nous basant sur un millier d'analyses effectuées simultanément par la méthode DYER, la méthode DUPUIS et la méthode BARBIER-MORGAN, en intrapolant quand c'était nécessaire, nous avons construit les courbes pour les différentes quantités d'acide phosphorique assimilable. Ces abaques nous permettent de déterminer, en retour, pour les terres acides dont notre région est presque exclusivement constituée, l'indice D. B.M. en fonction des indices DUPUIS et BARBIER-MORGAN. Pour éviter de confondre cet indice avec la quantité d'acide phosphorique assimilable, nous avons simplement supprimé la virgule du nombre qui exprime la quantité d'acide phosphorique assimilable pour obtenir l'indice. Ainsi, l'indice correspond sensiblement, en centigrammes par kilo de terre, à la quantité d'acide phosphorique que détermine la méthode DYER.

Voici, pour les sols acides des prélèvements qui nous ont servi pour une étude de la région d'Ancenis, la comparaison entre la méthode DYER et l'indice D. B. M. obtenu par les abaques.

TABLEAU VI

Indice Barbier-Morgan mg/l de solution	Indice Dupuis mg/kg de terre	Indice D. B. M. cg/kg de terre	P_2O_5 assimilable ‰	Écart absolu
1	130	13	0,13	0
2,5	60	11	0,09	+ 0,02
6	160	27	0,23	+ 0,04
0,5	10	2	0,02	0
1	40	6	0,07	— 0,01
8	150	28	0,30	— 0,02
1	20	4	0,04	0
1	60	8	0,10	— 0,02
4	120	20	0,23	— 0,03
2	50	9	0,10	— 0,01
1,5	40	7	0,05	+ 0,02
2	30	6	0,03	+ 0,03
0	20	3	0,03	0
1,5	60	9	0,11	— 0,02
1	70	9	0,11	— 0,02
1	20	4	0,02	+ 0,02
0,5	15	3	0,03	0
5	60	13	0,10	+ 0,03

On voit que la concordance est assez bonne, puisque la somme algébrique des écarts est de + 0,03, avec des écarts maximums de 0,04 p. 100. Pour les terres riches, ces écarts sont souvent plus importants, mais l'indice classe lui aussi les terres dans la catégorie des terres riches. Il n'y a donc pas d'erreur d'interprétation.

La figure 2 représente, à l'échelle 0,75, l'abaque que nous utilisons pour les terres riches. Pour plus de commodités et de précisions, nous utilisons jusqu'à l'indice D. B. M. 35 une abaque agrandie 4 fois pour les indices DUPUIS, et 5 fois pour les indices BARBIER-MORGAN, ce qui nous permet d'avoir une courbe pour chaque indice et de faire des lectures plus rapides et plus sûres.

Conclusion

La nécessité d'effectuer les analyses de terres en grandes séries nous a conduit à :

1° Adopter une méthode rapide de détermination de l'acide phosphorique contenu dans les extraits citriques de terres. La méthode molybdique avec l'acide ascorbique comme réducteur nous permet un gain de temps très appréciable par rapport à la méthode SCHEFFER-LORENTZ, sans diminuer la précision des résultats.

2° Rechercher une interprétation valable des méthodes rapides. En effet, la première modification apportée ne supprime pas le temps d'agitation très long qu'entraîne l'emploi de la méthode DYER et ne permet pas de faire de très grandes séries puisque le nombre de terres par série est limité par le nombre de places de l'agitateur. Dans ces conditions, il nous faut deux jours pour le dosage de l'acide phosphorique dans dix terres. L'emploi des méthodes rapides nous permet de doser l'acide phosphorique dans vingt-quatre terres en une demi-journée. La bonne concordance entre la quantité d'acide phosphorique assimilable et l'indice D. B. M. nous permet d'interpréter valablement les résultats obtenus par les méthodes rapides.

Nous utilisons ces méthodes depuis plusieurs années et elles nous ont toujours donné satisfaction.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) DENIGÈS (G.), CHELLE (L.) et LABAT (A.). — Précis de Chimie Analytique. 6e éd., 1930, p. 125.

(2) DUPUIS (M.). — Remarques sur une méthode rapide de dosage du phosphore dans les sols. *Annales Agronomiques*, 1950, p. 10.

(3) DEMOLON (H.). — Dynamique du sol. Cinquième édition, p. 392.

(4) DUCET et MENCL. — Séparation et dosage de faibles quantités de composés phosphatés acido-solubles. *Annales de physiologie végétale*, 1937, p. 17.

(5) JEAN (M.). — Étude du dosage du silicium et du phosphore par photométrie de leurs complexes molybdiques. *Chimie Analytique*, 1956, p. 37.

(6) PAILLUSSEAU (E.) et HURIEZ (H.). — Essais comparatifs sur l'évolution de la potasse et de l'acide phosphorique dans les terres par la méthode Barbier-Morgan et la méthode officielle. *Annales Agronomiques*, 1953, p. 257.

(7) HURIEZ (H.), PAILLUSSEAU (E.) et BOUVATTIER (C.). — Étude des terres de prairie en Loire-Inférieure. Conséquence des fumures habituellement pratiquées. *Annales Agronomiques*, 1955, p. 583.

631. 425 : 631. 411. 2

NOTES ANALYTIQUES

UTILISATION DU TRIPOLYPHOSPHATE DE SOUDE COMME PEPTISANT DANS L'ANALYSE PHYSIQUE DES SOLS

PAR

E. JOUIS, M. Th. LECACHEUX et F. CAUCHY
Station agronomique, Rouen.

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Introduction.
II. — Les polyphosphates peptisants.
III. — Propriétés du tripolyphosphate de soude.
IV. — Emploi du tripolyphosphate pour l'analyse granulométrique des sols.
1. Agitation par vibrations.
2. Catégories de sols à disperser.
a) Sols très calcaires et sols peu humifères.
b) Sols humifères non calcaires.
V. — Méthode adoptée.
a) Préparation d'une solution de tripolyphosphate de soude à 2 p. 100.
b) Titrage de cette solution.
c) Le vibrateur et son réglage.
d) Traitement préalable des terres humifères.
e) Peptisation par le tripolyphosphate.
f) Tamisages.
g) Détermination du limon et de l'argile.
VI. — Comparaisons.
a) Avec la méthode au citrate de soude pour les sols calcaires.
b) Avec la méthode classique à la soude pour les sols non calcaires.
VII. — Conclusion.
VIII. — Bibliographie abrégée.

Introduction.

Depuis la mise au point par Demolon et Bastisse (5) d'une méthode d'analyse des sols calcaires à l'aide du citrate de soude, la granulométrie des sols franchement calcaires a généralement été effectuée en France par cette méthode.

Nous l'avons, pour notre compte, utilisée jusqu'à ces derniers temps pour l'étude des alluvions modernes très calcaires de la Basse-Seine.

Toutefois, cette méthode ne peut pratiquement être conduite à la pipette de ROBINSON et elle nécessite par conséquent de nombreuses décantations longues et encombrantes.

On sait par ailleurs que plusieurs chercheurs à la suite de BOUYOUCOS (2-3), ont utilisé l'hexamétaphosphate de soude comme défloculant et surtout accéléré le décapage des particules terreuses grâce à un frottement énergique dans un mixer.

Ces méthodes à l'hexamétaphosphate sont souvent présentées comme des méthodes rapides pour lesquelles on se permet de ne pas éliminer la matière organique et le calcaire avant défloculation et dans lesquelles on apprécie l'argile par densimétrie ou par prélèvement à la pipette sur une faible profondeur.

Si l'on n'élimine pas la matière organique et le calcaire il est évident, ainsi que BOUYOUCOS le fait remarquer que ces éléments sont distribués entre les différentes classes de l'analyse. Indépendamment de la mise en suspension plus ou moins correcte des particules fines (argile) cette répartition supplémentaire d'un ou deux éléments est une cause de discordance avec les méthodes classiques. Mais ainsi que le souligne BOUYOUCOS, le prétraitement des sols à l'acide chlorhydrique et j'ajouterai : à l'eau oxygénée, pourrait bien ne pas être une sage méthode maintenant que l'on dispose de puissants moyens de peptisation directe, grâce aux polyphosphates et aux vibrateurs modernes à la fois doux et puissants.

Dans la méthode décrite ci-dessous, nous avons cherché à obtenir une bonne reproductibilité des dosages tout en maintenant un parallélisme avec les méthodes classiques et en particulier la méthode DEMOLON et BASTISSE pour les sols calcaires.

II. — Les polyphosphates peptisants.

D'après L. COLAS (4) on peut répartir les phosphates de sodium en trois catégories :

1. — Les orthophosphates, dérivés de H_3PO_4.

2. — Les métaphosphates, obtenus par déshydratation de l'orthophosphate monosodique au-dessus de 300°. On obtient une série de polymères.

$$n\,(NaH_2PO_4) \rightarrow (NaPO_3)_n + nH_2O$$

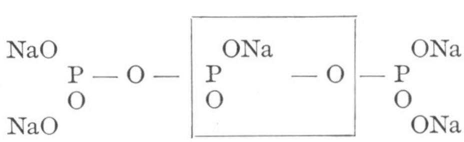
Le produit commercial est un haut polymère couramment appelé hexamétaphosphate de formule de base : $(PO_3)_6Na_6\ 10H_2O$.

3. — Le pyrophosphate, obtenu en traitant l'orthophosphate disodique par la chaleur :

$$2\,Na_2\,H\,PO_4 \rightarrow Na_4P_2O_7 + H_2O$$

L'intercalation d'un métaphosphate entre les deux fractions d'une molécule de pyrophosphate fournit un polyphosphate. Une telle chaîne en P_3 est le tripolyphosphate, corps cristallisé bien défini, alors que les polymères supérieurs sont vitreux et mélangés. Le tripolyphosphate a pour formule :

$Na_5P_3O_{10}$ ou



III. — Propriétés du tripolyphosphate de soude.

D'après la documentation St GOBAIN, le tripolyphosphate de soude est un constituant très employé des poudres détergentes modernes grâce à son pouvoir exceptionnel de séquestration des ions calcium, magnésium et fer ; à son grand effet peptisant, à sa bonne solubilité dans l'eau, à sa grande stabilité physique et chimique.

Il est très peu hygroscopique.

Une partie de son pouvoir dispersant est due à l'alcalinité de la solution aqueuse, très tamponnée. Le pH d'une solution à 1 p. 100 est compris entre 9 et 9,5.

Quant au pouvoir de séquestration, il est tel que le calcium complexé n'est plus décelable à l'oxalate de soude. On peut écrire :

$$Ca^{++} + P_3 O_{10}Na_5 \rightarrow (P_3O_{10} Ca) Na_3 + 2 Na^+$$

Une solution diluée, à la température ordinaire, complexe environ 10 grammes de calcium pour 100 grammes de tripolyphosphate.

Il faut bien remarquer que même à faible dose, nettement inférieure par exemple à celle nécessaire pour la séquestration de tout le calcium d'une prise de terre pour analyse, le tripolyphosphate exerce un effet défloculant et peptisant élevé.

Son action sur la dispersion des argiles est déjà employée dans plusieurs domaines, par exemple pour diminuer la viscosité des boues de forage de puits de pétrole.

Enfin le prix du tripolyphosphate est inférieur au prix de l'hexamétaphosphate jusqu'ici utilisé.

En janvier 1960 le kg de tripolyphosphate coûtait à Rouen 2,15 NF (par 50 kg) contre 3,25 NF pour l'hexamétaphosphate.

Voici les caractéristiques d'un tripolyphosphate commercial à 97,7 p. 100 de pureté :

P_2O_5	56,50 %	(théorie = 57,8 %)
SO_2Na_4	1,60	
NaCl	0,26	
Autres impuretés dosées	0,14	
Autres impuretés non dosées	0,30	
	100,00	

Perte à 100° = néant. Perte au feu = 0,4 %.

IV. — Emploi du tripolyphosphate de soude pour l'analyse granulométrique des sols.

1. — Agitation par vibrations.

Dans la méthode classique on agite par retournement pendant 1 ou 2 heures le flacon contenant la terre et le liquide dispersant (solution de soude, solution de citrate...) en réglant l'agitateur rotatif à 40 t. mn.

Par suite d'un changement d'agitateur, nous nous sommes d'ailleurs aperçu que la mise en suspension pouvait être défectueuse si l'agitation n'était pas assez énergique.

Dans la méthode de BOUYOUCOS et dérivées on se sert d'un mixer qui triture énergiquement une pâte de sol pendant 6 à 20 ou 25 mn. BOUYOUCOS indique qu'il ne faut pas dépasser 6 mn pour les sables car ils subissent une

abrasion. On peut donc se demander jusqu'à quel point des traitements mécaniques aussi énergiques ne fabriquent pas des éléments fins.

Nous avons préféré utiliser un vibrateur réglable dont le disque vibrant perforé travaille à 5 mm au-dessus du lit de terre.

Les avantages de ce dispositif sont sa simplicité et sa robustesse.

2. — Catégories de sols à disperser.

Au cours d'essais préliminaires, nous avons reconnu qu'une solution à 2 p. 100 de tripolyphosphate dans la proportion de 100 ml pour 10 g de terre de limon ou 20 g de terre sableuse convenait dans tous les cas quand la terre est peu humifère (moins de 2,5 p. 100 de matière organique).

D'ailleurs, une terre qui aurait un taux exceptionnel de 10 p. 1000 de calcium échangeable verrait son calcium largement complexé sur une prise d'essai de 10 g correspondant à 0,1 g de Ca puisque 2 g de tripolyphosphate peuvent complexer 0,2 g. On comprend donc qu'il soit inutile de faire un traitement préalable à l'acide chlorhydrique ou au chlorure de potassium.

Mais on constate que même les sols très calcaires, humifères ou non, sont toujours peptisés par cette petite dose de tripolyphosphate. On peut, en partie, expliquer cela par le fait que les sables calcaires n'interfèrent pratiquement pas avec le tripolyphosphate et que la matière organique est en partie enrobée par le calcaire dans des grains mixtes.

En conséquence, le tripolyphosphate permet de séparer les sables calcaires des sables siliceux comme dans la méthode DEMOLON et BASTISSE.

En fait, nous avons trouvé des doses analogues de sables dans des terres traitées au citrate de soude ou au tripolyphosphate.

Comme il n'est plus nécessaire d'effectuer un traitement préalable à l'eau oxygénée, on recueillera les débris organiques grossiers avec les sables. On pourra les éliminer en majeure partie en effectuant une rapide décantation à l'eau dans les capsules où sont recueillis les sables avant dessiccation et pesée.

On peut aussi les négliger, vu leur faible poids, s'il y en a peu.

La matière organique très fine, entraînée avec le limon ou l'argile pourra être soit négligée, soit détruite par quelques gouttes d'eau oxygénée sur une plaque chauffante.

Reste le cas des terres non calcaires mais plus ou moins humifères (vieilles prairies sur limon)...

Les déterminations comparées entre la méthode classique avec attaque par HCl dilué puis destruction des matières organiques par l'eau oxygénée, etc... et la mise en suspension directe par le tripolyphosphate montrent que le poids d'argile diminue assez fortement. Il apparaît donc que le complexe argilo-humique résiste bien au tripolyphosphate, comme d'ailleurs aux autres peptisants, d'où la nécessité d'une dislocation préalable par l'eau oxygénée.

Toutefois, nous ne recommandons pas le traitement poussé à fond, avec passage à siccité comme certains auteurs le préconisent. Il est certain qu'une attaque de ce genre augmente la proportion d'argile, même dans la méthode classique mais comme pour les préparations mécaniques trop vigoureuses, nous n'avons pas l'impression que cette argile supplémentaire existe réellement dans le sol.

Il faut admettre que les résultats d'une analyse physique dépendent un peu de la méthode adoptée. Il n'y a pas lieu d'augmenter à tout prix la quantité d'éléments fins par des méthodes trop drastiques et par surcroît longues et

onéreuses. De même que la méthode DEMOLON et BASTISSE avait pour but de ménager les sables calcaires qui jouent un rôle dans la porosité, de même le fait de ne pas effectuer d'attaque chlorhydrique sur des limons peut protéger des granules complexes formés de sable quartzeux ultra fin aggloméré par de la limonite lesquels constituent bien souvent la majeure partie de la petite quantité de sables grossiers des limons éoliens.

En définitive, nous n'avons envisagé que deux cas :

1. Terres très calcaires, ou terres contenant moins de 2,5 p. 100 de matière organique.

2. Terres peu calcaires ou non calcaires, mais avec plus de 2,5 p. 100 de matière organique.

On pourrait adopter une limite de matière organique un peu différente pour certains sols et notamment la relever si l'on se contente d'un moins bon accord avec la méthode classique notamment pour une appréciation rapide.

De toute façon il est toujours conseillé d'employer la même méthode pour toute étude comparative comme celle des terres d'une même région.

V. — Méthode adoptée.

a) SOLUTION DE TRIPOLYPHOSPHATE DE SOUDE A 2 P. 100.

Préparer à l'avance 1 ou 2 litres de cette solution en dissolvant 20 g par litre de tripolyphosphate commercial à 57 p. 100 de P_2O_5 à la température ambiante. Il convient de ne pas chauffer pour éviter une hydrolyse partielle.

Filtrer si la dissolution est légèrement trouble. Cette solution se conserve facilement plusieurs semaines et ne semble pas attaquée par les algues.

Déterminer le poids sec de 20 ml de solution en évaporant dans une capsule et en séchant à 103° dans une étuve. Ce poids sera à retrancher des poids secs des prélèvements d'argile ou d'argile plus limon à la pipette ROBINSON.

b) DOSAGE DU TRIPOLYPHOSPHATE DE SOUDE.

Le tripolyphosphate complexe le magnésium suivant la formule :

$$\underset{368}{P_3O_{10}Na_5} + \underset{24}{Mg^{++}} \rightarrow (P_3O_{10}Mg)\ Na_3 + 2\ Na^+$$

On utilisera, par exemple, une solution de chlorure ou de sulfate de magnésium N/10 préalablement titrée au Complexon III (sel disodique de l'acide EDTA) en présence de noir ériochrome T selon le mode opératoire usuel.

Prendre 10 ml de la solution magnésienne. Étendre à 100 ml dans un bécher. Ajouter un peu du tampon $NH_4\ Cl/NH_4$ utilisé en complexométrie. Ajuster au besoin le pH à 10. Ne pas dépasser pour éviter un excès gênant d'ammoniaque. Ajouter 10 gouttes d'une solution à 1 p. 100 de violet de pyrocatéchine. La coloration est vert-bleu.

Verser d'une burette la solution de tripolyphosphate à doser jusqu'au virage bleu-violet. Soit n ml pour 10 ml d'une solution magnésienne N/10 correspondent à 0,368 g de tripolyphosphate pur. On a : Tripolyphosphate pur par litre $= 0{,}368 \times 1000/n = 368/n$.

Il faudra donc verser environ 19 ml de solution.

c) QUALIFICATION ET RÉGLAGE DE L'AGITATEUR-VIBREUR.

L'appareil « Schallfix » de 50 watts dont nous nous servons est un appareil très simple, constitué par un noyau vibrant dans un stator alimenté en courant alternatif 24 volts par l'intermédiaire d'un transformateur.

Il se produit 100 cycles par seconde, d'une amplitude réglable de 0 à 2 mm.

Le mouvement est transmis à divers outils par une tige de longueur réglable.

Nous avons monté à l'extrémité de cette tige le disque perforé en acier inoxydable de 65 mm de diamètre comprenant 16 trous de 4 mm.

L'appareil se fixe sur un statif quelconque et ne nécessite aucun entretien.

Nous avons intercalé dans le fil d'alimentation du transformateur un interrupteur automatique Start-Stop, qui permet la mise en marche ou l'arrêt après un temps fixé à l'avance.

d) Traitement a l'eau oxygénée des terres humifères.

Les terres renfermant moins de 3 p. 100 de CO_3Ca et plus de 2,5 p. 100 de matière organique (ou 1,25 p. 1000 d'azote total) sont traitées à l'eau oxygénée.

Déposer 10 grammes de terre normale ou 20 g de terre sableuse (pauvre en colloïdes argileux) dans un bécher. Recouvrir par 30 à 40 ml d'eau oxygénée diluée (1 ml eau oxygénée 120 volumes dans 10 ml). Couvrir d'un verre de montre et porter environ 2 heures sur une plaque chauffante en maintenant juste sous l'ébullition. Agiter de temps à autre.

La terre se décolore, mais la solution surnageante peut rester colorée. Pour les terres riches en matières organiques, faire un second apport de 3 à 4 ml d'eau oxygénée à 120 volumes et continuer l'attaque. Refroidir. Centrifuger dans un tube de 100 ml. Décanter le liquide surnageant. Transvaser le culot dans un bécher en polyéthylène de 500 ml à l'aide de 100 ml de la solution de tripolyphosphate à 2 p. 100 et appliquer le traitement au vibreur comme il sera expliqué plus loin.

e) Terres contenant plus de 3 p. 100 de CO_3Ca ou moins de 2,5 p. 100 de matières organiques.

Placer 10 grammes de terre normale ou argileuse ou 20 grammes de terre légère, dans un bécher en polyéthylène de 500 ml placé sur une cale de 5 mm.

Verser sur la terre 100 ml de la solution de tripolyphosphate de soude à 2 p. 100 de produit commercial (environ 98 p. 100 de pureté).

Descendre le disque vibreur au contact de la terre, sans forcer. Retirer la cale. Régler le start-stop à 8 minutes. Envoyer le courant. Régler l'amplitude de la vibration (s'il y a lieu) pour avoir une vive agitation mais avec gouttes ne jaillissant pas à plus de 1 cm de la suspension.

Un temps trop court 2 à 3 mn serait insuffisant pour bien décaper les sables. 5 mn conviendraient, mais nous avons adopté 8 mn pour avoir une marge de sécurité. Avec un autre type d'appareil, il conviendrait de faire des essais pour fixer le temps de mise en suspension complète.

Notons qu'on ne doit pas mettre le tripolyphosphate à l'état de sel dans le bécher, car la dissolution ne serait pas assez rapide pour avoir une action complète au bout de 8 minutes.

f) Tamisages.

Après arrêt du vibrateur, relever le disque et le rincer d'un jet de pissette.

Transvaser la terre sur le tamis supérieur d'un jeu de tamis emboîtés. Nous utilisons des tamis métalliques, garnis de toile en acier inoxydable de 8 cm de diamètre.

Nous prenons pour le tamis inférieur, le plus fin, une ouverture de maille de 0,050 mm. L'ensemble repose dans un entonnoir cylindrique en verre épais et large douille, emmanché dans une éprouvette graduée de 1 litre. On transvase avec précaution, en tapotant les tamis (on peut relier le jeu de tamis à un vibrateur) car l'écoulement sur le tamis fin est assez lent, surtout s'il s'agit de terres limoneuses.

On rince à la pissette, tamis par tamis, en s'aidant au besoin d'une baguette à embout caoutchouté. Le volume total du liquide doit être inférieur à 1 litre.

Les sables sont recueillis dans des capsules en porcelaine, séchés à 103° et pesés.

Si ces sables contiennent des débris organiques on peut en éliminer la plus grande partie par quelques rapides décantations aqueuses, ce qui est facile pour les sables grossiers.

Les sables fins peuvent être traités par quelques gouttes d'eau oxygénée et passage à sec.

On pourrait aussi calciner à 450-500° mais le procédé serait plus long et délicat en présence de calcaire.

En réalité le poids de matière organique restante est généralement faible, surtout si on décante les débris en suspension.

Les liqueurs lourdes ne donnent pas de séparations franches car une partie de la matière organique est intimement pénétrée de sable très fin, ce qui lui donne une densité mal définie. Le problème est tout différent de celui qui consiste à reséparer un mélange de débris organiques neufs et de sables purs.

D'ailleurs, puisque un traitement assez énergique n'a pas extrait les particules minérales de ces débris il est normal de considérer qu'ils jouent le même rôle mécanique que les sables avec lesquels ils se sont séparés.

Si on désire connaître la matière organique totale par calcination comme il est facile de le faire par la méthode classique qui élimine presque entièrement la matière organique par l'eau oxygénée, il convient alors de tenir compte ou d'éliminer la matière organique recueillie dans les différentes fractions de l'analyse granulométrique, autrement la somme de ces fractions serait théoriquement équivalente à 100 p. 100.

On pourrait faire une attaque un peu poussée à l'eau oxygénée dans une capsule de porcelaine contenant 1 à 2 grammes de terre et repeser la capsule après séchage à 103° jusqu'à poids constant.

Dans le cas des terres calcaires, on recueille sur les tamis un mélange de sables calcaires et de sables siliceux.

La quantité de tripolyphosphate est en effet bien inférieure à celle qui permettrait de complexer tout le calcaire et d'ailleurs une partie du tripolyphosphate est engagée avec le fer, etc.

Dans ces conditions, on peut considérer que les sables calcaires sont pratiquement intacts et on peut les déterminer au calcimètre pour chaque numéro de tamis comme dans la méthode DEMOLON et BASTISSE.

g) DÉTERMINATION DU LIMON ET DE L'ARGILE.

Compléter à 1 litre dans l'éprouvette. Homogénéiser (nous employons des éprouvettes graduées bouchant émeri). Laisser reposer 4 mn 48 s à 20° (ou le temps approprié à une autre température). Pipeter 20 ml à la pipette ROBINSON, à 10 cm de profondeur pour avoir l'ensemble limon plus argile.

Réagiter, laisser reposer 16 heures (une nuit) et pipeter 20 cm de profondeur pour avoir l'argile.

Après évaporation de ces prélèvements dans des capsules, sécher à 103° et peser. Retrancher le poids de tripolyphosphate obtenu par évaporation de 20 ml de la solution à 2 p. 100.

Quelle que soit la forme sous laquelle le tripolyphosphate se trouve engagé après son action sur le sol, sa masse se retrouve proportionnellement dans les prélèvements dans la suspension.

VI. — Comparaisons.

a) Comparaison avec la méthode au citrate de soude.

Nous avons repris un certain nombre de sols de la vallée de Seine, précédemment analysés par la méthode Demolon et Bastisse.

Notons que même cette méthode classique présente quelques possibilités de divergence d'une analyse à l'autre.

La méthode au tripolyphosphate paraît plus constante. Par exemple, le sous-sol R 1630 de St-Maurice-d'Etelan à 35,4 p. 100 de calcaire total a fourni une somme argile + limon de 18 — 17,5 — 16,6 et 16,5 pour 4 analyses à plusieurs jours d'intervalle. Les teneurs en argile étaient de 10,0-9,0-6,5 et 8,25. La valeur 6,5 résulte d'un prélèvement un peu trop haut à la pipette.

Le sol R 1631 à 22,3 p. 100 de calcaire et 6,8 de matière organique a fourni pour 3 analyses 7,75-8,5 et 9,5 d'argile. Après destruction de la matière organique on a trouvé 10,25. En remplaçant le tripolyphosphate par l'hexamétaphosphate, après destruction de la matière organique on trouve 9,5. La méthode au citrate comportant destruction de la matière organique avait fourni 11,6.

L'échantillon R 1627 à 29,5 p. 100 de calcaire et 2,2 p. 100 de matière organique avait donné 14 p. 100 d'argile au citrate contre deux fois 17,5 par le tripolyphosphate.

Dans l'ensemble, il apparaît que le tripolyphosphate sans destruction de la matière organique, peptise plus fortement les sols calcaires que le citrate avec destruction de la matière organique. C'est ainsi que 11 sols de Berville-sur-Seine et St-Maurice-d'Etelan, allant de 5,5 à 19,5 p. 100 d'argile par la méthode au citrate, avec une moyenne de 13,4 p. 100 fournissent une moyenne de 14,8 p. 100 par le tripolyphosphate avec une échelle de 6,5 à 23 p. 100.

b) Comparaison avec la méthode a la soude pour les limons non calcaires.

Cette méthode classique comporte l'action successive de HCl, H_2O_2 et la peptisation par la soude.

Notons à ce sujet que le pH de la suspension contenant 10 ml de soude normale est de 11, alors que la suspension obtenue par le tripolyphosphate est voisin de 9. L'hexamétaphosphate employé à 2 g/l comme le tripolyphosphate ne fournit qu'un pH final de 6,5 environ.

Nous n'avons fait qu'un petit nombre d'essais, notre but principal ayant été de remplacer la méthode au citrate pour les terres calcaires.

Nous donnerons deux exemples : un sous-sol de limon du Pays de Caux, pH = 5,9, M. O. = 1,6 a fourni 18,5 et 20,5 avec tripolyphosphate sans destruction de la matière organique contre 19 pour la méthode à la soude.

Un sol du Pays d'Ouche, pH = 5,9 M. O. = 6,18 a fourni 14,5 p. 100 d'argile par le tripolyphosphate avec destruction de la matière organique contre

14,95 par la soude. Si l'on ne détruit pas la matière organique le tripolyphosphate fournit un chiffre faible = 8,5.

Dans l'ensemble, nous avons l'impression que le tripolyphosphate, même avec destruction de la matière organique, pourrait fournir un peu moins d'argile que la méthode à la soude, contrairement à ce que nous avons constaté dans la comparaison citrate/tripolyphosphate.

VII. — Conclusion.

Nous avons élaboré une méthode d'analyse granulométrique basée sur le tripolyphosphate de sodium comme peptisant et sur un vibrateur simple et robuste comme agitateur.

Cette méthode est avant tout destinée à l'analyse des sols calcaires. Pour les alluvions modernes de Basse-Seine, de bons résultats légèrement supérieurs en moyenne à ceux de la méthode au citrate de Demolon et Bastisse et paraissant plus réguliers sont obtenus sans destruction de la matière organique.

La nouvelle méthode étant relativement rapide et peu encombrante permet d'effectuer plus aisément des analyses en double ou des vérifications. Elle permet de distinguer les sables calcaires des sables siliceux comme dans la méthode au citrate.

RÉSUMÉ

Les auteurs présentent une méthode d'analyse granulométrique utilisant le triprolyphosphate de sodium comme peptisant et un vibrateur comme agitateur.

Cette méthode est surtout destinée à l'analyse des sols calcaires. Elle est relativement rapide, peu encombrante et permet d'effectuer facilement des analyses en double. Elle permet de distinguer les sables calcaires des sables siliceux, comme dans la méthode au citrate.

SUMMARY

The utilization of sodium tripolyphosphate for dispersion in mechanical soil-analyses ; application to calcareous soils.

The method described utilizes sodium tripolyphosphate as dispersant, and an automatic shaker, for mechanical analyses.

This rapid and easy method is particularly suited for calcareous soils, and makes duplicate determinations possible. Similarly to the citrate technique, the method is suitable for distinguishing between calcareous and siliceous sands.

ZUSAMMENFASSUNG

Verwendung des Natriumtripolyphosphats als Dispergierungsmittel bei Schlämmanalysen von Böden. Anwendung für kalkhaltige Böden.

Die Autoren legen eine Methode zur Körnungsanalyse dar welche Natriumtriphosphat als Dispergierungsmittel und an Stelle einer Schüttelmaschine ein Schwingungsapparat benützt. Diese Methode ist besonders für die Analyse von kalkhaltigen Böden bestimmt. Sie ist verhaltnissmässig schnell ausführbar, wenig versperrend und erlaubt, die doppelte Ausführung der Analyse leicht zu berwerkstelligen. Sie erlaubt wie in der Zitratmethode, Kalksand von Silikatsand zu unterscheiden.

Употребление триполифосфата натрия в качестве пептизанта в физическом анализе почв. Применение к меловым почвам.

Е. ЖУИС, Т. ЛЕКАШЭ и Е. КОШИ (Руан).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Авторы представляют метод гранулометрического анализа, пользующегося триполифосфатом натрия в качестве пептизанта и вибратором в качестве взбалтывателя.

Этот метод предназначается главным образом для анализа меловых почв. Он сравнительно скор, занимает мало места и позволяет легко делать параллельные анализы (analyses en double). Он позволяет отличать меловые пески от песков кварцевых, как и цитратный метод.

BIBLIOGRAPHIE ABRÉGÉE

(1) Bordas (J.), Huguet (Mme F.) et Meynadier (Y.). — Une mise au point de la technique des analyses granulométriques en grande série. Bull. AFES, nº 4, p. 164, 1958.

(2) Bouyoucos (George John). — The hydrometer as a new and rapid method for determining the colloïdal content of soils. *S. Sc.*, XXIII, p. 319, 1927.

(3) Bouyoucos (George John). — A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agron. Journal*, **43**, 9, sept., 434-438, 1951.

(4) Colas (L.). — Emploi des polyphosphates dans les circuits d'eau froide, chaude et potable. *L'Eau*, octobre, p. 233-239, 1959.

(5) Demolon et Bastisse (E.). — Sur la dispersion des colloïdes argileux. Application à leur extraction. *Ann. Agron.*, p. 1-15, 1935.

(6) Meriaux (S.). — Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. *Ann. Agron.*, 1, p. 5, 1954.

Le Directeur-Gérant : B. Laclavière.

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 29-6-1960

Dépôt légal : 2e trimestre 1960. Nº d'impression : 966

631 473 (611).

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES SOLS DU SUD TUNISIEN

PAR

H. N. LE HOUÉROU
Institut de Botanique, Montpellier.

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

CHAPITRE I. — **Le cadre géographique.**

CHAPITRE II. — **Les facteurs de la pédogénèse.**

§ 21. — Le substrat géologique.
§ 22. — L'hydrologie.
221. — Le ruissellement.
222. — Les nappes phréatiques.
§ 23. — Les formes du relief et le modelé.
231. — L'Atlas saharien et la Djeffara.
232. — La région saharienne.
§ 24. — Le climat.
241. — Les données météorologiques.
242. — L'aridité, la saison sèche.
243. — Les types de climats.
§ 25. — Les conditions biotiques.
251. — Le passé.
252. — L'occupation du sol.

CHAPITRE III. — **Les sols.**

§ 31. — Méthodologie.
311. — Travail sur le terrain.
312. — Travaux de laboratoire.
§ 32. — Généralités.
§ 33. — Classification.
§ 34. — Les principales catégories de sols du Sud tunisien.

341. — Étage des sols évolués.
3411. — Classe des sols steppiques.
3412. — Classe des sols halomorphes.
3413. — Classe des sols hydromorphes.
342. — Étage des sols non évolués.
3421. — Classe des sols bruts non climatiques.
3422. — Classe des sols bruts climatiques.
343. — Étage des paléosols.
3431. — Classe des paléosols calcimorphes.
3432. — Classe des paléosols hydromorphes.

CHAPITRE IV. — **Conclusions.**

INTRODUCTION

Au moment de quitter définitivement la Tunisie, nous avons voulu grouper dans ce bref mémoire l'essentiel des observations pédologiques que nous avons pu faire au cours des 6 années de recherches écologiques que nous avons consacrées au Sud tunisien

Le but principal de ces recherches n'était pas, à vrai dire, l'étude du sol mais celle des relations milieu-végétation[1]. Nous nous sommes cependant rapidement rendu compte que l'étude détaillée du sol était un des principaux fondements d'une interprétation correcte de la végétation et c'est pourquoi nous avons été amenés à accorder une importance particulière à la pédologie dans nos recherches. Ce faisant nous avons contracté une grande dette de reconnaissance envers les pédologues du Sud tunisien qui nous initièrent à leurs techniques : MM. P. DESSUS et J. GELPE. Mais, c'est surtout à M. G. AUBERT, chef du service des sols à l'O. R. S. T. O. M. que nous sommes redevables pour les conseils éclairés et les encouragements bienveillants qu'il nous a prodigués. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de notre respectueuse gratitude.

Étant écologiste et phytosociologue, nous avons étudié simultanément la végétation et les sols du Sud tunisien. Il ne sera question que des sols ici ; les références sommaires concernant la végétation sont seulement destinées à placer les profils décrits dans leur cadre écologique complet.

Les groupements végétaux cités et leur écologie font l'objet d'un mémoire séparé, en cours d'impression [2].

(1) Ces recherches se situaient dans le cadre des travaux d'Écologie et de Phytosociologie entrepris dans l'ensemble de l'Afrique du Nord sous la direction du Pr L. EMBERGER.

(2) Mémoires Hors Série de l'Institut de Recherches Sahariennes, Alger ; Lechevallier, éditeur Paris.

Chapitre I

LE CADRE GÉOGRAPHIQUE

La présente étude concerne la partie de la Tunisie située approximativement au sud d'une ligne Tamerza-Gafsa-Sfax ; ce n'est pas une limite arbitraire : elle correspond à une suite d'anticlinaux dépassant 1000 m, orientés E-W qui contribue à limiter vers le nord la pénétration de l'influence saharienne.

La partie septentrionale de notre dition (située entre la région des Chotts et la ligne anticlinale Tamerza-Mezzouna) est le prolongement en Tunisie de l'Atlas saharien, tandis que la partie située au sud des Chotts appartient à la Plateforme saharienne.

Les chaînes de montagnes couvrent près d'1/3 de la région. A l'est de Gafsa se dresse la chaîne de l'Orbata (1165 m) et du Bou Hedma, orientée E-W ; à l'ouest de Gafsa surgit un triangle formé par les Djebels Ben Younes, Bou-Ramli et Attig, d'orientation NW-SE et la chaîne des Djebels Alima-Seldja sensiblement orientée E-W. Dans ce triangle se rencontrent les principaux centres phosphatiers de Metlaoui, Redeyeff et Moularès. Plus au sud, en bordure des chotts se dresse une seconde chaîne ininterrompue mais d'altitude plus faible (600 m) qui va de Tozeur jusqu'aux environs d'Oudref près de Gabès. Entre cette chaîne et celle de l'Orbata Bou Hedma quelques monts isolés dominent les plaines : Djebels Berda, Chemsi et Sehib.

Au sud du Chott Fedjej entre Kebili et El Hamma de Gabès, le flanc sud d'un ancien anticlinal — le Djebel Tebaga — découpé en cuestas, assure la transition vers la Plateforme saharienne. Au sud-est du Djebel Tebaga les monts des Matmatas dominent de leurs falaises escarpées la plaine littorale de la Djeffara et s'inclinent doucement vers l'ouest, formant les Dahars(1) dont l'inclinaison aboutit à l'immense cuvette occupée par le grand Erg Oriental.

Sensiblement au centre de la plaine littorale de la Djeffara s'élèvent les petits massifs des Djebels Rehach et Sidi Toui.

Les reliefs sont entourés de vastes étendues basses et plates découpées par des oueds aux crues redoutables. Les principales plaines alluviales sont la plaine et le Segui de Gafsa, les steppes de Gouifla, le Bled Thala et le Segui de Gabès au nord de la chaîne de chotts. Au niveau de Gabès ces plaines se réunissent en un court sahel qui les relie au Sahel de Sfax, vers le nord et à la plaine côtière de la Djeffara, vers le sud. La Djeffara s'étend en faibles ondulations depuis le pied de la falaise des Matmatas jusqu'à la mer et se prolonge en Libye au sud, jusqu'à Homs, sur le rivage de la grande Syrte.

(1) Revers de Cuestas.

A l'ouest de Gabès, une vaste dépression comprend les chotts Fedjej, Djerid et Rharsa ; l'altitude de ces derniers s'abaisse respectivement à + 20 et — 23 m.

Diverses considérations d'ordre géographique, géologique, bioclimatique, biogéographique et morphologique sur lesquelles on ne peut s'étendre ici, conduisent à distinguer 6 régions naturelles principales dans le Sud tunisien.

1° la région de l'Atlas saharien ;

2° la Djeffara ;

3° Les Matmatas et leur prolongement le « Djebel » ;

4° la région des Chotts ;

5° les Dahars.

6° le Grand Erg Oriental.

Les trois premières peuvent être qualifiées d'arides ou de subdésertiques tandis que les autres font partie intégrante du Sahara.

Chapitre II

LES FACTEURS DE LA PÉDOGÉNÈSE

§ 21. — Le substrat géologique.

Du point de vue **tectonique** les géologues distinguent habituellement la province de l'Atlas saharien au nord des Chotts et celle de la Plateforme saharienne au sud.

La province de l'Atlas saharien présente un relief constitué soit de chapelets d'anticlinaux formant chaîne, soit d'anticlinaux isolés. Le tout est sensiblement orienté E-W.

Le style de ces anticlinaux est toujours identique : ils sont formés de plis coffrés, dissymétriques, à flancs raides avec de larges dos plats et présentent une tendance générale à se déverser vers le sud. L'Atlas tunisien sud-oriental se caractérise encore par la faible densité des axes anticlinaux, donc par la dominance des synclinaux. Les dépressions synclinales, parfois subsidentes, sont constituées par un remplissage continental d'âge miocène, mio-pliocène et quaternaire. Le chott Fedjej occupe le cœur d'un ancien anticlinal formé d'un vaste dôme en contact avec la Plateforme saharienne donc nettement différent des précédents. Le flanc sud de ce dôme est représenté par la chaîne du Tebaga.

La province de la Plateforme saharienne commence au sud des grands Chotts ; on ne trouve plus ici de plis bien marqués, très individualisés mais des mouvements amples à grand rayon de courbure déterminant des vastes dômes à faibles pendages tels que les Matmatas, les Dahars et le dôme de la Djeffara.

Du point de vue de la **stratigraphie** le Sud tunisien se caractérise par des affleurements strictement sédimentaires qui se développent depuis le Permo-Trias jusqu'au Quaternaire avec une grande extension des formations crétacées.

Le Permien affleure en un petit pli monoclinal situé au NW de Médenine sous la forme de schistes, grès et calcaires.

Le Trias inférieur affleure dans la région de Médenine en une mince bande au pied des Matmatas et sur le flanc nord du Djebel Rehach. Il est représenté par des grès rouges durs et des marnes.

Le Trias moyen affleure aux Djebels Rehach et Sidi Toui sous la forme de grès, calcaires et marnes.

Les affleurements du Trias supérieur et du Lias, localisés à l'Est de Tatahouine, sont formés de gypses massifs.

Le Jurassique est représenté entre Médenine et Dehibat par le Dogger : gypses, calcaires et marnes ; le Callovien, Oxfordien et Sequanien constitués de marnes grises et de calcaires ; le Kimmeridgien, dalle calcaire et le Portlandien : marnes sableuses et calcaires marneux.

Le Crétacé inférieur (Néocomien, Aptien, Albien) est principalement représenté par du Néocomien de faciès Wealdien à marnes bariolées, argiles, argiles sableuses, grès ferrugineux et conglomérats à bois silicifiés particulièrement développé dans la région du Fedjej. Dans la région de Gafsa le Néocomien se présente sous la forme de faciès néritiques, littoraux et lagunaires à grès, marnes, dolomies et gypses.

Le Crétacé moyen (Cénomanien-Turonien) constitue également des affleurements très étendus. Le Cénomanien de faciès néritique à lagunaire est commun dans presque tous les Djebels depuis Gafsa jusqu'à l'extrême sud, il affleure sur de très grandes surfaces sous la forme de calcaires plus ou moins dolomitisés alternant avec des marnes plus ou moins gypseuses. Le Turonien est représenté par une imposante dalle de calcaire à rudistes fortement dolomitisée qui forme le front des cuestas des Matmatas et couronne les buttes-témoins de la Djeffara.

Le Crétacé supérieur (Coniacien, Santonien, Campanien, Maestrichtien, Danien) présente également des affleurements étendus. Le Coniacien-Santonien affleure dans les Matmatas, les régions de Gafsa et de Tozeur sous la forme d'alternances marnocalcaires.

Le Campanien couvre d'immenses surfaces dans les Dahars où il est représenté par des calcaires crayeux à Inocerames avec quelques intercalations de marnes. Le Maestrichtien présente quelques affleurements en bordure de l'Erg sous la forme de calcaires siliceux à lumachelles ; d'importants affleurements de faciès néritiques existent à l'ouest de Gafsa.

Les calcaires marnes et gypses du Danien sont enfouis sous l'Erg et réapparaissent dans les régions de Rhadamès et de Gafsa.

L'Eocène est localisé dans l'Atlas saharien de la région de Gafsa. L'Eocène inférieur (Montien-Thanétien) lagunaire est représenté par des alternances de calcaires siliceux à lumachelles, de marnes siliceuses et de calcaires marneux ou gréseux phosphatés. L'Eocène moyen (Lutétien) est également de faciès lagunaire comprenant des gypses massifs et des marnes gypseuses à lumachelles. L'Eocène supérieur fait défaut.

Le Miocène marin (Vindobonien) est seulement connu par les sondages; il constitue le remplissage de la Djeffara où il se présente sous la forme d'un complexe sablo-argilo-marneux calcaire et gypseux.

Le Pontien affleure sur de grandes surfaces dans le Djerid et le Nefzaoua, il est formé de sables à vertébrés à la base et d'argiles au sommet.

Le Quaternaire marin est connu par une frange littorale presque continue depuis Monastir jusqu'en Libye. *On ne connaît ici aucune transgression ante-tyrrhénienne.*

Les formations quaternaires continentales occupent d'immenses surfaces en Tunisie méridionale. Elles sont représentées par : des croûtes calcaires, des encroûtements gypseux, des terrasses alluviales, des formations éoliennes d'accumulations (dunes et loess) ou d'ablation (regs). Ces formations seront étudiées dans le chapitre « Paléosols » (cf. infra).

Les données de la géologie nous fournissent des indications précieuses sur les substrats où se sont développés les sols et les matériaux originels dont sont issus les alluvions. L'on remarquera que la série stratigraphique comprend en majorité des calcaires, des grès, des marnes (souvent gypsifères) et des gypses. Ces faits expliquent l'abondance du calcaire, du gypse et du sel dans les alluvions et les sols du Sud tunisien et donnent, par conséquent, une première idée sur les matériaux qui ont subi les processus de la pédogénèse.

§ 22. — L'hydrologie.

221. — Le ruissellement.

Comme la plupart des régions arides chaudes, le Sud tunisien se caractérise par des écoulements intermittents. Les différents systèmes hydrologiques ne fonctionnent que quelques heures par an ; immédiatement après les pluies. La faible densité du couvert végétal et la quasi absence de matières organiques dans les sols ne peuvent, en effet, constituer de « volant hydrique » de telle sorte que des pluies relativement faibles (15-20 mm) suffisent à déclencher les écoulements.

Seules les parties les plus orientales de l'Atlas saharien, une partie de la Djeffara et du Djebel Matmata présentent des écoulements vers la mer. De façon générale, l'écoulement est endoréique : les eaux vont

s'évaporer dans les zones basses où la concentration des sels crée de vastes zones de sols salés. La région saharienne peut être qualifiée de subaréique. On y note, en effet, de rares écoulements ; mais au lieu d'écoulements annuels réguliers, comme dans l'Atlas saharien, les oueds peuvent rester à sec pendant plusieurs années consécutives. Les écoulements sahariens proviennent d'ailleurs le plus souvent de pluies tombées sur les reliefs périphériques.

Les oueds issus des Matmatas et de l'atlas saharien coulent en moyenne 2 à 3 fois par an : en octobre-novembre et en février-mars. La quantité d'eau ruisselée peut être évaluée grâce à une formule empirique établie par E. Berkaloff et J. Tixeront (1958) selon laquelle $R = \frac{3E_2}{P_3}$; P et E étant la pluviosité moyenne et l'évapotranspiration potentielle exprimées en m d'eau. Les mesures effectuées sur certains oueds du sud montrent que cette formule créée à partie d'observations effectuées dans des régions plus humides constitue également une approximation convenable pour le sud.

Le ruissellement moyen annuel est de l'ordre de 140.000.000 m³ pour l'ensemble de la Tunisie du sud. Un système hydraulique d'importance moyenne pour la région, tel l'oued Djir issu des Matmatas, draine environ 3.000.000 m³ par an. Il faut noter que le ruissellement peut varier dans des proportions énormes d'une année à l'autre (du simple au décuple).

222. — **Les nappes phréatiques.**

La concentration du ruissellement dans certaines dépressions contribue à former des nappes phréatiques temporaires ou permanentes ; ces nappes sont généralement riches en sulfates et en chlorures. Une nappe particulièrement importante s'étend sur une partie du Nefzaoua et du Rherib (entre le Chott Djerid et le Grand Erg Oriental). Ces nappes donnent naissance à des sols hydromorphes à encroûtement généralement gypseux ou à des sols salins.

Les eaux usées en provenance des oasis tendent à former autour de celles-ci des nappes phréatiques peu profondes qui ceignent les palmeraies d'une frange de sols hydromorphes plus ou moins salins et de sols salins.

§ 23. — Les formes du relief et le modelé.

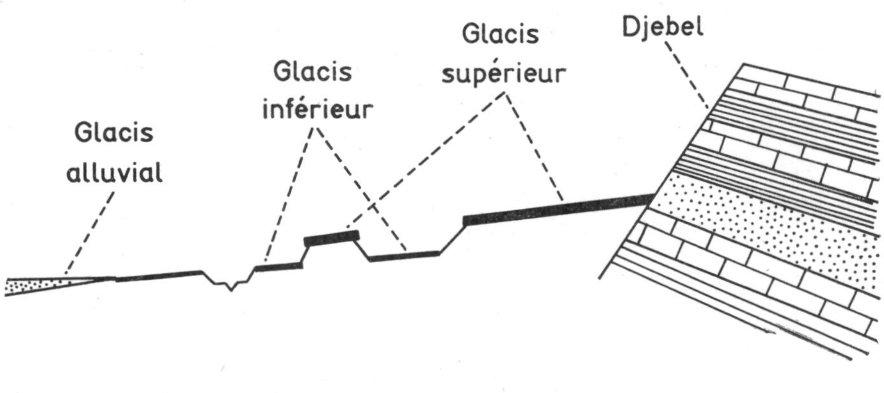
La morphologie du Sud tunisien permet de distinguer ici deux régions principales : l'Atlas saharien et la Djeffara ou prédomine l'érosion fluviatile, tandis que la région saharienne se caractérise par la primauté des actions éoliennes.

231. — L'atlas saharien et la Djeffara.

Cette région offre les caractères morphologiques habituels des régions arides. L'ossature du paysage est formée par des plis monoclinaux escarpés essentiellement constitués d'alternances de calcaires et de marnes. Ces plis sont plus ou moins entaillés par des combes qui dégagent des lignes de crêtes se succédant souvent en chevrons. Au dessus de la plaine côtière ou « Djeffara » le djebel Matmata dresse les festons de ses cuestas couronnées par les puissantes dalles de calcaire dolomitique du Cénomanien et du Turonien.

Les piedmonts voient se développer trois (parfois quatre) glacis emboîtés résultant de la coalescence d'une suite de cônes d'épandages formés par les oueds issus des Djebels par des canyons étroits : les « Foums ». Ces glacis se développent dans un matériau meuble, d'âge variable, nivelé et recouvert d'une pellicule de quaternaire alluvial, généralement encroûté dans les glacis supérieur et moyen.

Le glacis supérieur est généralement réduit à de minces lanières interfluviales ou a des buttes-témoins, couronnées par des croûtes calcaires ou gypseuses. Le glacis moyen prend, au contraire, une grande extension, également sous la forme de croûtes calcaires ou plus souvent, gypseuses. Dans ce niveau moyen s'emboîte une basse terrasse qui longe les oueds principaux pour s'épanouir à l'aval en un troisième glacis alluvial aux abords du niveau de base. Les profils convergent donc généralement à l'aval. On peut parfois observer, au-dessus du glacis supérieur, accrochés au Djebel, des niveaux aplanis, encroûtés, que J. DRESCH et R. COQUE rapportent à un hypothétique quatrième glacis, évidemment plus ancien.



R. COQUE a montré que cette alternance de phases de creusement et de planation latérale qui caractérisent la morphogénèse quaternaire de la Tunisie présaharienne est le résultat des pulsations climatiques post-villafranchiennes ; les phénomènes d'orogénèse et de subsisdence y

paraissent, en tous cas, étrangers. Nous reviendrons en détail sur les croûtes qui ont fossilisé les glacis d'érosion si étendus dans la Tunisie subdésertique.

232. — **La région saharienne.**

La morphologie saharienne paraît plus diversifiée ; en réalité on retrouve, sous diverses formes, des éléments analogues. Ainsi, le relief est ici représenté par des surfaces structurales à dalles rocheuses dénudées : les *Hamadas* qui recouvrent certaines buttes témoin ou *Gour* (1) dont le *Kreb* (falaise) n'est pas autre chose qu'une cuesta. Certaines surfaces structurales à roches plus friables donnent naissance à des *Regs autochtones*. Les glacis sont remplacés par des *Regs allochtones*. On peut en compter trois ; les deux supérieurs présentent souvent une croûte calcaire ou gypseuse tandis que le niveau le plus bas (anciennes terrasses et anciens glacis alluviaux) est généralement constitué de formations pulvérulentes (carbonates, sulfates) ou *Fech-Fech*.

Ces diverses formes peuvent se couvrir de dunes : les cordons dunaires du Grand Erg reposent souvent sur des « Gours » ; les Barkhanes, au contraire, se localisent sur les hamadas et les regs alors que les oueds sont signalés par des chapelets de *Nebkas* (2).

En somme, le modelé saharien se présente ici comme une ancienne morphologie aride reprise et modifiée par les actions éoliennes.

§ 24. — **Le climat.**

241. — **L'aridité, la saison sèche.**

On entend par saison sèche l'ensemble des mois pour lesquels l'évaporation dépasse la somme des précipitations, compte tenu des réserves en eau du sol (Transeau, Thornthwaite). La durée et l'intensité de la saison sèche nous sont donc fournies par le bilan hydrique établi par la méthode de Thornthwaite.

La saison sèche dure (tableau V).

8 mois à Matmata	avec un	déficit	en eau de	757	mm.
11 mois à Sfax	—	—	—	768	mm.
11 mois à Gabès	—	—	—	820	mm.
11 mois à Djerba	—	—	—	835	mm.
9 mois à Ben Gardane	—	—	—	846	mm.

(1) Singulier : « Gara », à ne pas confondre avec « Garaa » : dépression inondable à sol non salé.
(2) Nebka : tumulus de terre (en général du sable) s'élevant autour d'un végétal ligneux qui s'exhausse au fur et à mesure que la terre s'amoncelle ; les Nebkas peuvent atteindre jusqu'à 4-5 m de haut et 10-50 m de diamètre.

11 mois à Gafsa	—	—	—	890 mm.
11 mois à Medenine	—	—	—	955 mm.
11 mois à Tatahouine	—	—	—	957 mm.
11 mois à Metlaoui	—	—	—	984 mm.
12 mois à Remada	—	—	—	1049 mm.
11 mois à Kebili	—	—	—	1070 mm.
12 mois à Tozeur	—	—	—	1082 mm.
12 mois à Rhadamès	—	—	—	1184 mm.

TABLEAU I

Données météorologiques (1901-1950).

Stations	Pluviosité	M	m	$\overline{m}$	Evap. (Piche)
Matmata	239	35,2	5,4	18,9	
Djerba	207	32,6	8,3	20,0	
Zarzis	202				
Sfax	197	30,8	6,8	18,9	2 055
Ben Gardane	181	35,9	3,9	19,4	
Allouet el Gounna	180				
Gabès	175	32,7	5,9	19,3	2 022
Gafsa	152	38,1	3,9	19,3	2 858
Medenine	141	36,8	6,2	20,5	
Metlaoui	137	37,7	5,5	20,3	2 431
Moularès	130				
Tatahouine	128	37,9	4,8	20,2	
Redeyef	126				
Sidi Toui	103				
Bordj le Bœuf	101				
Dehibat	95				
Tozeur	90	40,4	5,3	21,3	
Kebili	88	42,2	3,1	20,9	
Mechehed Salah	81				
Remada	75	30,7	5,7	20,7	3 136
Ksar Rhilane	62				
Fort Saint	36				
Rhadamès	45	41	3,4	22,1	4 261

$\overline{m}$ moyenne des températures annuelles.
M moyenne des maximums du mois le plus chaud.
m moyenne des minimums du mois le plus froid.

Pluviosités mensuelles (cf. tableau II).
Déficit de saturation (cf. tableau III).
Évapotranspiration potentielle (cf. tableau IV).
Bilan hydrique (cf. tableau V).

Les divers indices climatiques proposés pour la classification des climats arides concordent sensiblement. Nous avons comparé entre eux les indices d'EMBERGER, GAUSSEN, de MARTONNE, THORNTHWAITE, DUBIEF, SZYIEMKIEWICZ, etc... Les stations se classent dans le même ordre que celui obtenu en fonction de la pluviosité.

En fait, tout se passe comme si la pluviosité était ici le seul facteur d'aridité ; cette anomalie paraît due aux différences thermiques relativement faibles entre les stations et probablement aussi aux différences peu tranchées dans le régime de répartition saisonnière des précipitations.

TABLEAU II

Hauteurs moyennes des précipitations mensuelles
(1901-1950, d'après la Météorologie Nationale)

Station ou Poste	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Sfax	25	18	26	13	10	5	1	2	22	28	31	16	197
Gafsa	17	13	22	16	10	8	2	4	14	14	18	14	152
Metlaoui	15	11	16	14	11	5	1	7	14	13	17	13	137
Tozeur	10	8	13	10	5	3	0,2	2	7	9	12	10	89
Gabès	22	17	21	10	9	1	0,4	2	14	30	34	15	175
Djerba	28	19	22	11	8	1	0,3	0,9	13	34	43	27	207
Ben Gardane	35	22	23	11	5	0,6	0	1	11	19	31	22	181
Matmata	34	28	42	16	15	4	0,4	4	11	22	38	25	239
Medenine	20	18	25	10	7	1	0,4	1	8	16	20	15	141
Tatahouine	22	13	26	10	7	1	0	2	8	10	16	13	128
Kebili	12	8	16	9	5	1	0,4	0,4	4	8	15	10	89
Remada (1)	14	8	9	12	3	1	0	2	5	9	6	6	75
Rhadamès (1)	7,5	8	8	4	2	0,5	0	2	3	6	2	5	44,5

(1) Période 1944-1957.

TABLEAU III

Déficit de saturation (en Millibars)

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M	T
Zarzis	4,4	3,5	2,9	5,2	3,8	7,4	5,2	6,7	5,7	5,3	3,6	2,6	4,6	55
Djerba	2,1	2,7	5,0	7,0	6,2	12,5	9,0	9,0	10,3	6,8	4,6	4,0	6,6	79
Sfax	4,4	4,3	5,4	6,3	7,4	9,1	10,3	9,8	7,5	7,4	5,4	4,3	6,8	81,6
Gabès	4,2	4,5	6,9	7,6	7,5	12,5	13,0	11,5	11,2	8,8	7,6	6,4	8,4	100
Tatahouine	3,6	4,0	5,4	8,4	14,3	15,4	18,6	18,5	14,5	10,2	6,1	4,5	10,2	123,5
Gafsa	2,8	4,6	6,8	10,6	12,0	24,5	28,0	23,0	15,7	10,0	5,7	4,5	12,3	148,2
Remada	4,1	6,7	9,2	13,2	14,1	28,5	26,0	23,0	22,0	14,1	7,0	6,8	14,5	174,7
Rhadamès	5,3	7,5	12,6	21,2	24,0	35,5	38,4	32,0	35,0	20,3	10,0	7,5	20,7	249,3

TABLEAU IV

Evapo-transpiration potentielle (en mm.).

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Sfax	22	25	40	58	89	127	155	154	125	90	46	24	933
Gabès	18	23	44	65	98	132	167	167	129	86	45	22	996
Matmata	16	20	34	58	94	149	186	176	132	81	40	18	1 004
Ben Gardane	16	21	41	69	105	143	173	166	136	92	44	20	1 026
Djerba	21	26	44	68	96	132	175	168	136	97	51	28	1 042
Gafsa	12	17	37	63	114	162	195	184	133	79	32	14	1 042
Tatahouine	15	20	41	69	111	160	190	179	144	91	42	19	1 085
Medenine	18	22	41	70	111	160	190	179	145	93	46	21	1 096
Metlaoui	12	18	38	69	122	176	205	194	144	83	36	14	1 111
Remada	14	25	43	65	131	171	192	187	144	87	43	17	1 119
Kebili	9	16	40	77	128	184	211	201	159	89	33	11	1 158
Tozeur	11	17	38	73	136	187	214	201	157	87	35	15	1 171
Rhadamès	10	19	48	92	159	196	205	196	156	98	37	12	1 229

243. — Les types de climats.

L'application de la méthode d'EMBERGER nous permet de distinguer dans le Sud tunisien 2 climats principaux avec deux sous-climats possédant chacun plusieurs variantes. En fonction du quotien pluviothermique ($Q = \frac{1000\ P}{M_2 - m_2}$; avec $T_0 = -273$) on distingue le climat *méditerranéen aride* ($12 < Q < 35$) et le climat *méditerranéen saharien* ($Q < 12$).

Les coupures entre ces climats sont établies à l'aide de données de la biogéographie, de la phytosociologie et de l'agronomie. Ces données nous amènent à subdiviser ici ces climats généraux en sous-climats:

aride supérieur : $25 < Q < 35$;
aride inférieur : $12 < Q < 25$;
saharien supérieur : $5 < Q < 12$;
saharien inférieur : $Q < 5$.

Toujours en fonction des réalités biogéographiques et agronomiques, ces sous-climats sont à leur tour subdivisés en variantes d'après la valeur de *m* (moyenne des minimums du mois le plus froid). Ainsi :

variantes à hivers chauds : $m > 7$;
variantes à hivers doux : $7 \geqslant m > 5$;
variantes à hivers tempérés : $5 \geqslant m > 3$;
variantes à hivers frais : $3 \geqslant m > 0$;
variantes à hivers froids : $0 \geqslant m$.

Il est malheureusement impossible de s'étendre ici sur les considérations d'ordre biogéographique et agronomique qui justifient ces divisions climatiques. Pour plus de détails on se reportera à notre thèse (1959). Disons seulement, à titre d'exemple, que les gelées ne sont pas à craindre dans les variantes à hivers chauds ($m > 7$), tandis qu'elles interviennent 1 à 5 jours par an dans les variantes à hivers doux ($7 > m > 5$), etc... On voit immédiatement l'importance de ces notions pour l'agronome.

En conclusion : tous les climats du Sud tunisien appartiennent à la gamme des climats méditerranéens, y compris le climat saharien inférieur où n'existent pas de pluies estivales. Le climat saharien proprement dit ne se rencontre qu'au Sahara central, où se font sentir à la fois les influences méditerranéennes et tropicales et où les pluies peuvent survenir en toute saison mais demeurer absentes pendant plus d'une année (EMBERGER, 1937). Ce n'est pas le cas ici, car il pleut tous les ans à Rhadamès, et jamais en été.

§ 25. — Conditions biotiques.

251. — Le passé.

Les vestiges humains sont connus dans le Sud tunisien depuis l'Acheuléen final à faciès Micoquien (— 150.000 ans?) des environs de Gafsa et Redeyef.

Les civilisations préhistoriques se sont succédées depuis sans interruption avec un développement particulièrement important après le dernier grand pluvial (plus ou moins contemporain de la glaciation européenne de Würm). La civilisation Capsienne (—8000 à —4000 av. J.-C.) a, en effet, laissé de très nombreux vestiges dans la région de l'Atlas Saharien jusqu'au bord des Chotts. L'influence néolithique, au contraire, s'est surtout manifestée dans la région saharienne.

La civilisation néolithique saharienne semble avoir coincidé avec une dernière récurrence humide d'origine tropicale dont les manifestations n'ont guère dépassé la régions des Chotts.

Il est acquis que les Atériens-Moustériens, voire probablement les Capsiens, ont connu dans la région de Gafsa la forêt climacique de chêne-vert et de pin d'Alep que l'on rencontre encore dans la Dorsale tunisienne sous des pluviosités de 400 à 600 mm. C'est très probablement dans cet état forestier peut être déjà plus ou moins dégradé que les marins de Tyr, puis les Carthaginois et enfin les premiers Romains connurent l'arrière pays des Syrtes ou les éléphants étaient encore connus à l'époque de Salluste et de Pline l'Ancien.

La colonisation romaine, surtout du IIe au Ve siècle, déboisa les plaines ; celles-ci se couvrirent d'oliviers ; on trouve encore de nombreux vestiges d'industrie oléicole dans des zones aujourd'hui désolées. On admet que la superficie des plantations atteignit alors 1.300.000 ha (contre 700.000 actuellement) pour le Centre et le Sud tunisiens ce qui permettait de nourrir une population 3 fois plus forte que l'actuelle et qui faisait dire aux historiens arabes qu'à l'époque de l'empire romain on pouvait se rendre de Tripoli à Tunis à l'ombre des oliviers.

Après la dissolution de la 3e Légion Augusta, les nomades jusqu'alors contenus au-delà du *limes* firent des incursions de plus en plus fréquentes et vers le milieu du Ve siècle les nomades tripolitains étendirent leur domination jusqu'à Gafsa.

Les cultures ruinées, laissèrent la place à la steppe que les pasteurs chameliers parcourront dès lors pendant près de quinze siècles ; cependant, les traditions agricoles romaines se maintiendront jusqu'à nous chez les berbères retranchés dans le Djebel Matmata ainsi que chez les insulaires

de Djerba. C'est à partir de ces noyaux que l'on voit actuellement les olivettes gagner peu à peu sur la steppe. On peut, schématiquement, distinguer quatre phases successives d'occupation du sol dans les plaines de l'Atlas saharien et de la Djeffara :

1° forêt ± claire jusqu'à l'époque romaine ;

2° mise en culture entre le IIe et le Ve siècle ;

3° steppisation et nomadisme du Ve au XXe siècle ;

4° extension progressive des cultures depuis le début de ce siècle.

Sur le relief, la dégradation forestière semble continue depuis l'époque romaine mais particulièrement accélérée depuis 70 ans puisque les explorateurs du début du siècle ont parcouru des forêts aujourd'hui disparues, jusque dans la chaîne des Chotts.

252. — L'occupation du sol.

La densité de la population est très variable : l'île de Djerba compte plus de 100 habitants au km² : les zones d'oasis en comportent presque autant ; la Djeffara et les Matmatas ont une densité de 30 h/km² la région de l'Atlas saharien environ 20. La région saharienne a évidemment une densité beaucoup plus faible, difficile à apprécier en raison du nomadisme, mais en moyenne de l'ordre de 0,01 à 5 habitants au km².

La région saharienne est à peu près uniquement occupée par une steppe à chaméphytes très ouverte où la couverture du sol peut varier de 5 à 20 p. 100. Dans la région de l'Atlas saharien, de la Djeffara et des Matmatas, les glacis d'érosion encroûtés sont couverts d'une steppe à chaméphytes vouée au pâturage ou la couverture végétale atteint 20 à 60 p. 100.

Les glacis alluviaux non salins, les terrasses d'oueds et les plaines alluviales sont l'objet de cultures épisodiques de céréales dont l'extension varie du simple au décuple avec l'importance des pluies automnales. Des barrages sont établis sur certains thalwegs et permettent alors les plantations arbustives. Dans la région de l'Atlas saharien et de la Djeffara 10 à 15 p. 100 de la surface sont occupés par des cultures épisodiques d'orge, tandis que les steppes couvrent 80 à 90 p. 100 ; les cultures arbustives et les oasis ne représentent guère plus de 1-2 p. 100 de la superficie totale. Dans la région saharienne la quasi totalité de la surface du sol est vouée au pâturage extensif du type nomadisant (les troupeaux ne quittent pas le Sahara) ; alors que les pâturages de l'Atlas saharien sont du type extensif transhumant (les troupeaux passent souvent l'été dans le Tell de la Tunisie septentrionale).

CHAPITRE III

LES SOLS

§ 31. — Méthodologie.

Nous avons mené nos études des sols du Sud tunisien par des méthodes courantes qui sont habituellement admises par la plupart des pédologues. Il y a lieu de distinguer les méthodes de travail sur le terrain et en laboratoire.

311. — Travail sur le terrain.

L'étude sur le terrain a été faite au moyen des critères morphologiques habituels de texture, structure, compacité, couleur, réaction à HCl, etc..., analysés pour les différentes strates du profil jusqu'à une profondeur de 2 m. L'observation sur tranchées a toujours été préférée aux sondages ; ceux-ci n'intervenant que pour des contrôles destinés à vérifier les hypothèses découlant des observations faites sur les tranchées. L'étude du sol en place a été menée de front avec l'étude détaillée de la végétation ; notre souci constant étant de chercher les corrélations entre les sols et la végétation. Cette méthode s'est avérée féconde et nous a évité beaucoup de tâtonnements inutiles, car les limites visibles sur la végétation indiquent presque toujours des variations dans les profils, ce qui permet de placer rapidement et à bon escient les fossés ou tranchées d'observations et, le cas échéant, de tracer des limites avec un minimum d'erreurs.

Outre la végétation, la topographie et la géomorphologie sont des éléments de base dans la prospection. La topographie permet de mettre en évidence des chaînes de sols ; la géomorphologie fournit des éléments d'appréciation importants dans l'interprétation de la pédogénèse et permet de comprendre la répartition des sols.

312. — Analyses [1].

Nous avons adopté les techniques proposées par J. DESAUNETTES et dont nous donnons ici l'essentiel [2].

[1] Les analyses ont été réalisées soit au laboratoire de la section de Pédologie de Tunisie sous la direction de Mme HOLDERBACH, soit au Laboratoire d'Agronomie de l'École d'Agriculture de Tunis, sous notre direction.

[2] Pour plus de détails cf. J. DESAUNETTES : Les méthodes analytiques employées au laboratoire de Pédologie de Tunis. — Dir. Trav. Publics. — Tunis, 1955.

3121. — ANALYSES PHYSIQUES

La granulométrie est appréciée par tamisage 2 000 à 100 μ et par sédimentation (Méthode Robinson) de 0 à 100 μ. La dispersion est réalisée à l'Hexamétaphosphate de sodium [1].

Nous avons adopté l'échelle granulométrique proposée par P. DESSUS pour les sols du Sud tunisien.

Tamisage :

1 000 à 2 000 μ : sable très grossier ;
500 à 1 000 μ : sable grossier ;
200 à 500 μ : sable demi-grossier.
100 à 200 μ : sable demi-fin.

Sédimentation :

50 à 100 μ : sable fin (sablon) ;
20 à 50 μ : sable très fin (limon grossier) ;
2 à 20 μ : limon ;
0 à 2 μ : colloïdes minéraux.

L'humidité équivalente a été mesurée en partie par centrifugation à 1 000 γ pendant 20 minutes, en partie par la méthode du vide.

Le pH est apprécié par la méthode électrométrique. Le p. 100 de saturation de la pâte est noté ; il correspond à peu près à la limite de liquidité d'Atterberg. La conductivité est mesurée sur les solutions extraites de pâtes saturées, ce qui offre l'avantage de fournir des chiffres comparables quelle que soit la texture.

3122. — ANALYSES CHIMIQUES

Azote : méthode Kjeldahl.

Carbone : méthode Anne.

Matière organique : C × 1,724.

CO^3Ca total : calcimètre Bernard amélioré.

Chlore : méthode titrimétrique classique au NO_3Ag en présence de CrO_4K_2.

Sulfates - solubilisation au CO_3Na_2, précipitation par Cl_2Ba et gravimétrie.

Calcaire actif : méthode à l'oxalate d'ammonium de Drouineau-Gallet.

Capacité d'échange à pH 7 : méthode classique à l'acétate d'ammo-

(1) Pour les analyses mécaniques des terres gypseuses effectuées par nous-mêmes, nous avons utilisé la technique préconisée par DURAND (1949, C. R. Ac. Agric. T. 36, p. 671-672), qui fait intervenir la solubilité du gypse dans les solutions de NaCl. Malgré cela les chiffres concernant la granulométrie nous paraissent très sujets à caution ; *ils ne sont donnés ici qu'à titre indicatif*. Cette lacune est palliée, en partie, par la mesure de l'humidité équivalente.

nium après lessivage à l'eau distillée bouillante ; dans les sols calcaires et gypseux la capacité d'échange trop faible est corrigée : $Tc = T + \frac{T}{10}$.

Bases échangeables alcalines : dosage au photomètre de Na et K dans le percolat obtenu à l'acétate d'ammonium (après lessivage).

Bases échangeables alcalino-terreuses : complexométrie.

§ 32. — Les sols. Notions générales.

L'étude des données géologiques nous a montré que la série stratigraphique du Sud tunisien est essentiellement constituée d'alternances de calcaires, de marnes plus ou moins gypseuses et de gypses.

L'étude des formes du relief nous a montré que la région présaharienne se présente sous l'aspect d'une alternance d'anticlinaux escarpés, érodés aux pieds desquels s'emboîtent une série de glacis d'érosion plus ou moins fossilisés par les croûtes quaternaires. Tandis que la région désertique se caractérise par un modelé éolien surimposé à une ancienne morphologie subdésertique.

Ces faits ont une influence déterminante sur la nature, la genèse et la répartition des sols. Du point de vue chimique, les sols du sud se caractérisent par la présence constante du calcaire, celle, très fréquente, du gypse et l'extension des sols salés. Du point de vue pédogénétique le fait dominant est la faible et lente évolution vers des types eux-mêmes peu évolués ; le sol climatique par excellence est un sol brun subdésertique sur alluvions anciennes dans la zone aride. Dans la région saharienne, il n'y a pas de sols évolués mais ces sols (regs et ergs) peuvent cependant être considérés comme climatiques.

Ces sols subdésertiques posent d'ailleurs un problème de nomenclature. Les différents auteurs ne s'accordent pas sur l'acception de termes tels que *Sierozem*. Pour les Russes[1], KUBIENA, DUCHAUFOUR, PLAISANCE et CAILLEUX, etc., le terme *Sierozem* est synonyme[2] de sols gris subdésertiques tandis que certains pédologues de l'école d'AUBERT désignent par *Sierozem* des sols steppiques de couleur brune. Nous avons cru devoir différencier :

1° Les sols gris subdésertiques (Sierozem, KUBIENA-DUCHAUFOUR et autres) à encroûtement superficiel ;

2° Les sols bruns subarides relativement riches en matière organique (*Burozem* de KUBIENA et des auteurs Russes) comprenant 2-3 p. 100 de M. O. selon KUBIENA et 1,5-3 p. 100 selon AUBERT.

3° Les sols bruns subdésertiques nettement plus pauvres en M. O.

(1) Cf. LOBOVA (H.), 1956 : Les sols de la zone aride de l'U. R. S. S.
(2) Plus exactement : l'expression « sol gris » est la traduction littérale du terme « Sierozem ».

(0-1 p. 100). Lorsque ces sols bruns subdésertiques présentent un profil uniforme ils correspondent au Sierozem de certains élèves d'AUBERT. Dans le cas, ici plus général, où existe en profondeur un horizon à nodules calcaires ou gypseux nous avons cru devoir créer des sous-groupes originaux.

De façon générale, si l'on excepte les paléosols, il n'existe pas de sols évolués sur roche-mère en place ; les sols évolués se sont toujours différenciés dans des alluvions ou des colluvions. Ces faits s'expliquent aisément par l'érosion intense due au climat et accentuée par l'inclinaison généralement forte des roche-mères en place qui donnent naissance à des sols squelettiques constamment renouvelés par l'érosion.

Les formations que l'on désigne généralement dans la Tunisie méridionale par « sols à croûte » ne résultent pas de phénomènes actuels. On sait que les croûtes se sont constituées durant les périodes rhéxistasiques du quaternaire entre le Villafranchien et le Tensiftien. Deux cas se produisent : ou bien ces croûtes ont été alluvionnées ou colluvionnées par la suite, et l'on obtient alors généralement des sols gris subdésertiques au cours d'une nouvelle évolution ; ou bien, ces croûtes sont restées dénudées et il faut alors les classer dans les paléosoles. Ces croûtes dénudées occupent de vastes surfaces en Tunisie méridionale ; le fait même de leur extension crée des problèmes importants et difficiles pour la mise en valeur et justifie donc leur étude par l'écologiste et l'agronome.

§ 33. — Classification des sols. Principes.

Nous adoptons ci-après une classification très largement inspirée de celle proposée par G. AUBERT (1952 : DEMOLON, Dynamique du sol ; 1956 : AUBERT et DUCHAUFOUR, 6e congrès international de la Science du sol ; 1958 : classification pour la carte d'Afrique au 1/5 000.000 ; 1958 : cours professé à l'O. R. S. T. O. M., etc.).

Dans ces différentes classifications provisoires la terminologie varie quelque peu, surtout dans les termes supérieurs, bien que « l'esprit » de la classification soit demeuré le même. Ces classifications sont fondées sur des critères évolutifs et morphologiques. La base en est le « groupe de sols » qui représente le type d'évolution du sol. Cependant, ces classifications n'ont pas prévu les paléosols ; considérant ceux-ci comme des roches-mères de nouveaux sols, ce qui n'est pas toujours le cas. Les paléosols prennent une grande extension dans le Sud tunisien sous forme de croûtes ou encroûtements quaternaires dont l'évolution est achevée depuis les dernières récurrences humides. Il nous semble qu'on ne peut classer ces paléosols avec les sols actuels en cours d'évolution ; on ne peut pas non plus les ignorer car ils occupent de vastes surfaces et constituent souvent

le seul substrat édaphique ou puisse se développer la végétation. Il nous a donc paru opportun de grouper les paléosols dans une unité supérieure autonome. Par ailleurs, nous avons subordonné les termes de la nomenclature suivant les classifications définitivement admises dans les autres sciences : c'est ainsi que l'ordre doit être subordonné à la classe ; que le groupe doit être subordonné à l'ordre, etc.

Les Étages définissent des sols évolués, non ou peu évolués et des paléosols.

Les Classes et *les Ordres* correspondent aux facteurs fondamentaux de la pédogénèse (climat, lithologie, végétation, etc.).

Les Groupes correspondent aux processus généraux d'évolution du sol. Le Groupe est l'unité fondamentale.

Les Sous-Groupes définissent l'intensité des processus ou la diversification par des processus secondaires.

Les Familles rendent compte de la nature pétrographique de la roche-mère.

Les Séries définissent la profondeur du profil ou la puissance de certains horizons.

Les Types correspondent à la texture des horizons supérieurs.

Les Phases sont déterminées par l'action humaine, animale ou leurs conséquences (pâturage, culture, érosion, alluvionnement, etc.).

I. Etage des sols Evolués.
- 1. Classe des sols steppiques.
 - A. Ordre des sols subdésertiques.
 - *a*) Groupe des sols bruns subarides.
 - *b*) Groupe des sols bruns subdésertiques.
 - α) Sous-Groupe à profil homogène.
 - β) Sous-Groupe à nodules (nobis).
 - + Famille à nodules calcaires.
 - + Famille à nodules gypseux.
 - *c*) Groupe des sols gris subdésertiques (= Sierozem) :
 - α) Sous-Groupe à imprégnation calcaire.
 - β) Sous-Groupe à imprégnation gypseuse.
 - γ) Sous-Groupe à imprégnation calcaro-gypseuse.
- 2. Classe des sols halomorphes.
 - A. Ordre des sols salins (Solontchacks).
 - *a*) Groupe des sols salins typiques.
 - α) Sous-Groupe des sols fortement salins (hypersolontchaks).
 - β) Sous-Groupe des sols moyennement salins (mésolontchaks).
 - γ) Sous-Groupe des sols faiblement salins (hyposolontchaks).

δ) Sous-Groupe des sols à salure profonde (cryptosolontchaks).
b) Groupe des sols salins à encroûtement.
α) Sous-Groupe des sols moyennement salins.
β) Sous-Groupe des sols faiblement salins.
B. Ordre des sols salins à alcali.
a) Groupe des sols fortement salins.
b) Groupe des sols moyennement salins.
c) Groupe des sols faiblement salins.
3. Classe des sols hydromorphes.
A. Ordre des tirs.
a) Groupe des sols tirsifiés.
B. Ordre des sols à concrétions et carapaces de nappe.
a) Groupe des concrétions et encroûtement gypseux.
C. Ordre des sols à croûtes ou carapaces superficielles de bas-fonds.
a) Groupe des croûtes gypseuses de transport.
D. Ordre des gleys.
a) Groupe des gleys profonds.
II. — Etage des sols non ou peu évolués.
1. Classe des sols bruts non climatiques.
A. Ordre des sols squelettiques d'érosion.
a) Groupe des lithosols.
b) Groupe des régosols.
α) Sous-Groupe des loess.
B. Ordre des sols d'accumulations.
a) Groupe des apports fluviatiles.
α) Sous-Groupe des colluvions.
β) Sous-Groupe des alluvions.
b) Groupe des sols éoliens.
α) Sous-Groupe des dunes.
β) Sous-Groupe des nebkas.
γ) Sous-Groupe des voiles et placages.
2. Classe des sols bruts climatiques.
A. Ordre des sols désertiques.
a) Groupe des sols peu soumis à l'action du vent.
α) Sous-Groupe des hamadas [1].
b) Groupe des sols d'ablations ou regs.
α) Sous-Groupe des regs autochtones.
β) Sous-Groupe des regs allochtones.
+ famille des regs sableux.
+ famille des regs pulvérulents.

[1] Ce n'est pas la hamada elle-même qui est à l'abri du vent, mais le micro-sol qui se développe dans les diaclases de la surface structurale.

c) Groupe des sols d'accumulation.
α) Sous-Groupe des voiles et placages.
β) Sous-Groupe des micro-dunes.
γ) Sous-Groupe des nebkas.
δ) Sous-Groupe des barkhanes.
ε) Sous-Groupe des cordons dunaires et oghourds.

III. — Etage des paléosols.
1. Sous-étage des paléosols évolués.
A. Classe des paléosols calcimorphes.
a) Ordre des croûtes calcaires.
b) Ordre des croûtes gypseuses.
B. Classe des paléosols hydromorphes.
a) Ordre des sols tourbeux.
— groupe des tourbes mésotrophes.

§ 34. — Les principales catégories de sols du Sud tunisien.

341. — Étage des sols évolués.

Suivant les facteurs essentiels de la pédogénèse on distingue les sols steppiques liés à la présence d'un faible couvert végétal, donc relativement pauvres en humus et d'évolution lente, les sols halomorphes évoluant sous l'influence de sels solubles et les sols hydromorphes évoluant en présence de l'eau, qui détermine des phénomènes d'oxydo réduction et d'évaporation intense.

3411. — CLASSE DES SOLS STEPPIQUES

Sous le climat aride de la Tunisie méridionale la steppe à chaméphytes est une formation lâche ; il s'ensuit que la teneur du sol en matière organique reste très faible et atteint rarement 1 p. 100. Ces sols se développent toujours dans des alluvions ou colluvions quaternaires en Tunisie méridionale.

Suivant que le fer est individualisé ou non dans le profil, on distinguera les sols bruns subdésertiques et les sols gris subdésertiques.

A. — Ordre des sols subdésertiques

a) *Groupe des sols bruns subarides* (*Burozem*).

Nous mentionnons ces sols pour mémoire. Ils se développent surtout au nord de notre dition, dans la Tunisie centrale. Plusieurs profils décrits par R. Sabathé et J. Bouraly, notamment, appartiennent à ce groupe. Ces sols ont en commun : une teneur en matière organique de 2 à 3 p. 100

dans les horizons supérieurs, une couleur brun-jaunâtre, une teneur en calcaire de 5 à 20 p. 100 avec la présence assez fréquente en profondeur de nodules calcaires plus ou moins farineux. Ils se développent sous des pluviosités comprises entre 250 et 400 mm, dans des roches meubles : alluvions et colluvions de texture plus ou moins moyenne. Ils présentent beaucoup d'analogies avec le groupe suivant, dont ils diffèrent par une plus grande teneur en humus.

b) *Groupe des sols bruns sub-désertiques*

Généralités.

L'évolution des alluvions conduit le plus souvent à ce groupe de sols en Tunisie du sud ; nous avons étudié un grand nombre de profils qui peuvent se rattacher à ce groupe. On rencontre ces sols depuis le Centre-Sud (Maknassy) à pluviosité voisine de 200-250 mm jusqu'en bordure de la zone saharienne (Sidi Toui), c'est-à-dire jusque sous une pluviosité de 100 mm. Mais il y a lieu de remarquer que ces sols se trouvent en toutes positions topographiques vers 200-250 mm tandis que de 150 à 100 ils se limitent de plus en plus dans les thalwegs, les dépressions et basses terrasses, c'est-à-dire dans toutes les zones où l'appoint d'eau constitué par le ruissellement vient corriger une pluviosité déficiente. Les sols bruns subdésertiques se différencient surtout des sols bruns subarides par une teneur beaucoup plus faible en matière organique : toujours moins de 1 p. 100 au lieu de 2-3 p. 100.

Nous distinguons les sols à profil homogène de ceux qui présentent des horizons à nodules. Les premiers sont beaucoup plus rares et correspondent très probablement à des formes de jeunesse des seconds.

α. *Sous-groupe des sols bruns subdésertiques à profil homogène.*

1. — *Description.*

Profil P1. — Le profil suivant a été étudié entre Gabès et Médenine non loin de l'oued Zeuss. Long. E, 10°19'40" × lat. N. 33°30'40", altitude : 90 m.

Pente : très faible, exp. : S., couverture du sol : 20 p. 100 . Végétation : Association à *Ziziphus Lotus et Retama raetam* (LE HOUÉROU 1956). Utilisation : culture épisodique de céréales. Surface glacée-colmatée sur 2-3 mm.

0-100. — Sable fin peu limoneux ; structure nuciforme assez lâche ; racines, radicelles. couleur [1] 5 YR 6/6 (jaune-rougeâtre).

[1] Couleur appréciée sur le sol en place à l'aide du code « Munsell Soil Color Charts ».

Sec. Rares et très fins pseudomyceliums calcaires, très rares nodules calcaires de consistance friable à ferme. HCl^{++}(1).

100-300. — Sable fin très peu limoneux à structure particulaire assez serrée ; racines et radicelles ; quelques rares et petites taches jaune-rouille. Couleur : 5 YR 7/8 > 5 YR 6/6 (jaune-rougeâtre dominant sur rouge-jaunâtre). HCl^{++}.

β. *Sous-groupe des sols bruns subdésertiques à nodules.*

1. — *Description.*

Profil P2. — Le profil ci-après a été étudié peu au nord de Gafsa sous une pluviosité de l'ordre de 170 mm. Terrasse de l'oued Sefioume. Longitude E 8°15'00", Latitude N 34°31'15". Pente 1 p. 100, exposition SE. Couverture végétale : 30 p. 100. Steppe de chaméphytes à *Artemisia campestris* et *Thymelaea microphylla*(2). Utilisation ; pâturage. Surface : sableuse.

0-65. — Sable moyen à grossier, faiblement gypseux (pas de cristaux visibles) ; quelques rares nodules calcaires farineux de 0,5 à 5 cm de Ø. Structure particulaire lâche ; HCl^{++}. Humide. Racine et radicelles. Couleur : 5 YR 6/8.

65-140. — Sable demi grossier à structure particulaire, faiblement gypseux (pas de cristaux visibles). Très nombreux nodules calcaires friables à farineux de 1 à 5 cm de Ø. HCl^{++}. Racines et radicelles, frais. Couleur 5 YR 6/8 > 5 YR 8/3.

140-200. — Sable demi-grossier à dominance siliceuse ; très rares nodules calcaires friables. Structure particulaire. Très humide. Racines et radicelles. HCl^{+}. Couleur 5 YR 7/8.

Profil P3. Ce profil a été étudié au SW de Gabès dans les piedmonts des Matmatas sur une terrasse de l'oued Djir (Pluviosité 180 mm. Longitude E 10°3'36", Latitude N 33°41'06". Pente 0. Couverture végétale 60 p. 100. Steppe de chaméphytes à *Rhantherium suaveolens* et *Artemisia campestris*. Utilisation : pâturage.

Surface du sol : voile de sable éolien de 2 à 20 cm d'épaisseur formant des micro-nebkas avec les touffes de *Rhantherium*.

0-10. — Voile de sable fin éolien, mobile, sec ; couleur 7,5 YR 6/6. HCl^{+}.

10-60. — Sable fin à structure particulaire lâche avec quelques petits nodules calcaires de 0,2 à 0,5 cm à la partie inférieure. HCl^{+}. Racines et radicelles ; sec ; couleur 5 YR 6/6.

(1) Signes conventionnels exprimant la réaction à HCl du sol en place :
HCl = 0 : pas de réaction.
HCl ≠ 0 : réaction faible.
HCl^{+} : réaction moyenne.
HCl^{++} : réaction forte.

(2) Il s'agit très exactement de la *variante* à *Artemisia campestris* de l'association à *Arthrophytum Schmittianum* et *Thymelaea microphylla* (Le Houérou, 1959).

P1 — Analyses

Profondeur	Granulométrie								Humidité équival. %	pH
	1000 à 2000 μ	500 à 1000	200 à 500	100 à 200	50 à 100	20 à 50	2 à 20	— de 2 μ		
0-100	0	0	1	16	50	12	8	13	9	8,1
100-300	0	0	2	12	57	16	5	8	—	7,8

	Milliéquivalents %				% de terre sèche			
	Cap. Ech.			Na % de Tc	CO_3Ca total	CO_3Ca actif	Cl	SO_4
	T	Tcorr	Na					
0-100	6,5	7,1	2,3	32,3	15,3	1	0,04	0,4
100-300	6,7	7,3	2,3	31,5	14,5	0,5	0,08	0,3

P2 — Analyses

Physiques.

Profondeur	Granulométrie								Extrait pâte saturée				pH
	1000 à 2000 μ	500 à 1000	200 à 500	100 à 200	50 à 100	20 à 50	2 à 20	— de 2 μ	Cl — ‰	RS ‰	cond. mmhos.	% de saturation	
0-65	2	12	38	17	14	3	6	8	0,17	0,31	0,59	20,8	8
65-140	2	11	38	16	11	0	10	12	0,17	0,61	1,1	26,8	7,8
140-200	2	15	53	16	5	1	4	4	0,17	0,87	1,5	17,8	8,6

Chimiques

	Milliéquivalents %				% terre sèche			
	Cap. Ech.			Na % Tc	CO_3Ca total	CO_3Ca actif	Cl —	SO_4
	T	T corr	Na					
0-65	9,5	10,4	0,45	4,3	11,9	6,0	0,01	0,57
65-140	4,5	4,9	0,15	3,0	20,4	10,5	0,005	0,49
140-200	4,1	4,5	0,10	2,0	6,4	1,5	0,01	0,65

P3 — Analyses

Physiques.

Profondeur	Granulométrie								Extrait pâte saturée				Humidité équiv. %	pH
	1 000 à 2 000 µ	500 à 1 000	200 à 500	100 à 200	50 à 100	20 à 50	2 à 20	-de 2 µ	Cl- ‰	Rs ‰	conduct. mmhos	% saturation		
0-10	0	0	0	10	81	6	1	2	0,17	1,30	1,12	28,4	4,0	8,3
10-60	0	1	1	15	66	6	3	8	0,26	1,12	0,97	31,8	6,0	8,3
60-200	0	1	2	11	46	20	10	10	0,35	0,75	1,25	31,6	11,0	8,2

Chimiques.

Profondeur	Milliéquiv. % — Cap. Ech.			Na % Tc	% terre sèche			
	T	Tcorr	Na		CO_3Ca total	CO_3Ca actif	Cl-	SO_4
0-10	4,0	4,4	3,6	8,2	6,1	3,0	0,005	0,6
10-60	6,0	6,6	0,5	8,3	12,6	5,5	0,01	0,4
60-200	7,7	8,4	1,0	11,9	21,3	11	0,01	0,2

Profil N° 4.

Analyses physiques

Profondeur cm.	Granulométrie %								Extrait de pâte saturée				Humidité équivalente %
	STG	SG	S 1/2 G	S 1/2 F	SF	STF	L	Coll. Min.	pour 1000		conductivité mmhos	% de saturation	
	2000 à 1000 µ	1000 à 500 µ	500 à 200 µ	200 100 µ	100 à 50 µ	50 à 20 µ	20 à 2 µ	— de 2 µ	Cl —	RS			
0 — 52	1	2	2	31	51	5	2	6	0,35	0,56	1	3,6	6,0
52 — 80	4	11	3	27	37	5	4	9	0,17	0,42	0,78	3,1	7,0
80 — 100	6	14	3	19	36	6	8	8	0,17	0,56	1,15	2,7	8,0
100 — 115	8	16	4	14	30	7	11	10	0,26	0,74	1,57	4,1	7,1
115 — 160	2	11	5	11	27	11	10	11	0,53	1,85	2,3	3,3	9,7

Analyses chimiques.

Profondeur	milliéquivalents %				% Terre sèche						
	Capacité d'échange			Na % de Tc	CO_3 Ca Total	CO_3 Ca actif	Cl	SO_4	pH	SO_4 Ca $2H_2O$	Cl Na
	T	Tcorr	Na								
0 — 52	6,3	6,9	0,25	3,6	4,7	1,7	0,005	0,3	7,8	0,5	0,008
52 — 80	5,8	6,4	0,20	3,1	6,8	3,0	0,005	0,3	7,7	0,5	0,008
80 — 100	5,0	5,5	0,15	2,7	18,7	8,5	0,005	0,3	7,5	0,5	0,008
100 — 115	4,4	4,8	0,20	4,1	28,9	14,5	0,01	0,4	7,4	0,7	0,016
115 — 160	5,5	6,0	0,20	3,3	31,5	15,5	0,01	0,4	7,4	0,7	0,016

60-200. — Sable fin à très fin, peu limoneux à structure nuciforme serrée. Très nombreux nodules calcaires friables. HCl^{++}, sec. Couleur 5 YR 6/6.

Profil P4. — Situation : Thalweg dans le flanc sud du Djebel Sidi Toui. Pente 2 p. 100. Exposition Ouest. Altitude 150 m. Pluviosité 100 mm. Coordonnées : 32° 42′10″ N × 11° 15′30″ E. Surface sablonneuse. Couverture végétale 30 p. 100. Association à *Rhanterium suaveolens* et *Asphodelus refractus* (LE HOUÉROU 1956, 1959). Utilisation : pâturage steppique.

0-52. — Sable fin dominant sur sable grossier ; structure particulaire lâche ; racines, radicelles ; trainées noires de racines mortes en décomposition ; sec ; couleur 5 YR 7/8 (jaune-rougeâtre).

52-80. — Sable moyen très peu limoneux (plus grossiers de 70 à 80 cm) ; quelques nodules calcaires de 0,5 à 2 cm de diamètre ; nombreuses racines et radicelles ; structure particulaire serrée ; sec ; couleur 5 YR 6/8 (jaune-rougeâtre).

80-100. — Sable moyen très calcaire, très peu limoneux ; structure particulaire serrée ; assez dur ; très nombreux nodules calcaires de 0,5 à 5 cm de diamètre ; sec ; couleur 7,5 YR 8/6 (jaune-rougeâtre pâle).

100-115. — Sable moyen très calcaire ; structure serrée ; consistance assez friable à peu friable ; nombreux nodules calcaires assez durs, parfois rubannés, ayant tendance à former encroûtement sec ; radicelles ; couleur 5 YR 8/3 (rosé).

115-160. — Sable fin très calcaire avec de nombreux nodules ; poches de sable très grossier ; radicelles ; sec ; assez friable ; structure particulaire demi-serrée (très lâche dans les poches de S. G.) ; couleur 5 YR 8/4 (rose-brun).

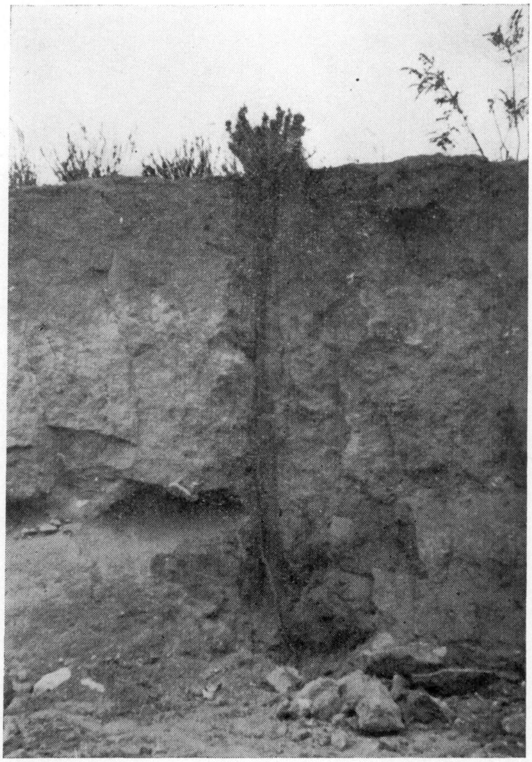
160. — Dalles calcaires rubannées ; croûte saumon.

Végétation : association à *Rhantherium suaveolens* et *Asphodelus refractus*.

2. — *Interprétation.*

Cette catégorie de sols est très abondamment représentée en Tunisie méridionale ; un grand nombre de profils décrits par P. DESSUS, J. GELPE, R. SABATHE et nous-mêmes s'y rattachent. Un fait est à peu près constant : la présence en profondeur (généralement à plus de 30-50 cm) d'horizons à nodules calcaires et, parfois, calcaro-gypseux. La teneur en matières organiques est faible, presque toujours inférieure à 0,5 p. 100 ; ce qui distingue ces sols des Burozems. Il semble que l'aggravation de la sécheresse du climat soit le facteur prépondérant de cette pédogénèse, puisque l'on passe progressivement des sols châtains aux sols bruns subarides (Burozem), puis aux sols bruns subdésertiques au fur et à mesure que les conditions d'aridité s'accentuent.

Le profil P4 montre qu'il peut y avoir lessivage du calcaire jusque sous une pluviosité de 100 mm à condition, semble-t-il, qu'il y ait un appoint d'eau de ruissellement qui ramène le sols aux conditions climatiques normales. C'est-à-dire une pluviosité de 150-250 mm ; il en résulte que plus la pluviosité s'affaiblit, plus ces sols tendent à se localiser dans les dépressions temporairement suralimentées en eau par le ruissellement.



Sol brun sudésertique à profil homogène, avec, ici, un début de différenciation d'un (B).
cf : profil P. 1.

3. — *Classification.*

Le profil P2 serait à classer :

Classe des sols steppiques.
 Ordre des sols subdésertiques.
 Groupe des sols bruns subdésertiques.
 Sous-groupe des sols bruns subdésertiques à nodules.
 Famille à nodules calcaires.
 Série à sols très profonds.
 Type à sable demi-grossier.

P3 idem.

Série à sols très profonds.

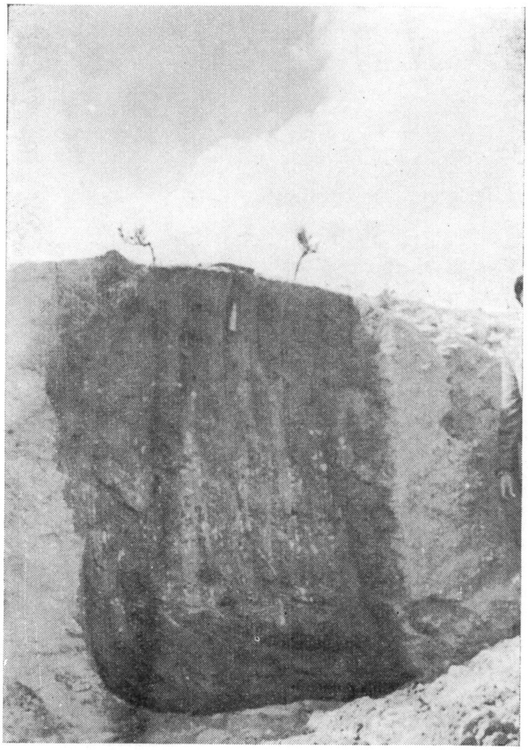
Type à sable fin.

Phase à voile éolien superficiel.

P4 idem.

Série à sols profonds sur croûte calcaire.

Type à sable demi-fin.



Sol brun subdésertique à nodules calcaires. cf : P. 2.

c) *Groupe des sols gris subdésertiques* (Sierozem : LOBOVA, KUBIENA, DUCHAUFOUR).

α. — Description.

Le groupe des sols gris subdésertiques diffère essentiellement du précédent par l'absence ou la faible quantité de fer libre et la présence près de la surface, et non en profondeur, d'un horizon enrichi soit en calcaire, soit en gypse.

La teneur en matière organique est du même ordre que dans les sols bruns subdésertiques (0 à 0,8 p. 100). On trouvera ci-après deux descrip-

tions de profils étudiés dans les environs de Sened (nord-est de Gafsa) et dans la région de Tozeur. La pluviosité de ces régions est respectivement de 160 et 90 mm.

Profil 5. — Localisation : 2 km sud-est du village de Sened, pente 1,5 à 2 p. 100, exposition Nord, plaine alluviale, altitude 430 m. Coordonnées : 34° 31′55″ N × 9° 15′05″ E. Surface sableuse, steppe à chaméphytes couvrant 60 p. 100 de la surface du sol.

0-25. — Sable moyen à grossier ; structure particulaire lâche ; nombreuses racines et radicelles ; couleur 5 YR 7/1 (gris-rosé). Analyses : calcaire total 3 p. 100 ; matière organique : 0,32 p. 100.

25-30. — Sable grossier à moyen ; structure serrée ; incrustée de calcaire tendant à former un encroûtement friable ; couleur 5 YR 9/1 (blanc rosé). Analyses : 10 p. 100 de calcaire total ; 0,1 p. 100 de matières organiques.

30-200 et au-delà. — Sable grossier peu graveleux à structure particulaire très lâche ; nombreuses racines et radicelles ; couleur 5 YF 6/2 (gris-beige) ; 1,5 p. 100 de calcaire total.

Végétation : association à *Rhantherium suaveolens* et *Artemisia campestris* (Le Houérou, 1956, 1959),

Profil 6. — Localisation : El Hamma du Djerid ; altitude 90 m ; position topographique dôme ; pente 3 p. 100 ; exposition Est. Coordonnées : 33° 58′ 00″ N × 8° 06′ 20″ E. Surface : sablo-graveleuse nue à 95 p. 100.

0-60. — Sable grossier à moyen peu gypseux ; structure particulaire lâche ; humide ; racines ; radicelles ; couleur 7,5 YR 7/4 (gris-rosé). Analyses : conductivité 3,2 mmhos ; humidité équivalente 7 p. 100 ; capacité d'échange 3,4 ; calcaire total 8,4 p. 100 ; pH 7,9 ; ClNa 0,008 p. 100 ; $SO_4Ca\ 2H_2O$ 7,2 p. 100 ; Na p. 100 de cap. éch. 46.

60-200. — Sable grossier à moyen avec imprégnation de calcaire et de gypse (surtout entre 60 et 100 cm) ; structure particulaire assez serrée ; humide ; racines et radicelles ; couleur 7,5 YR 7/8 (jaune-rougeâtre).

Analyses : conductivité 4 mmhos ; humidité équivalente 11 ; capacité échange 9,1 ; Na p. 100 de cap. éch. : 18,6 ; CO_3Ca total 12,4 p. 100 ; pH 7,8 ; $SO_4Ca\ 2H_2O$ 14,6 p. 100 ; ClNa 0,016 p. 100. Végétation : association à *Brocchia cinerea, Cyperus conglomeratus* et *Cornulaca monacantha* (Le Houérou, 1959).

β. — *Interprétation.*

Les deux sols décrits ci-dessus sont assez différents par leur chimisme et par leur génèse. Le profil P5 s'est différencié dans l'alluvion

qui lui a donné naissance par imprégnation calcaire d'un horizon superficiel probablement par migration ascendante.

Le profil P6 s'est différencié par imprégnation de gypse. Il est probable que ce dernier profil, situé entre les chotts Djerid et Rharsa se soit enrichi en gypse et en chlorures par apports éoliens. Les sels étant entraînés vers le bas du profil (accumulation de gypse entre 60 et 100). On notera que dans la partie supérieure près de la moitié du complexe est saturé en Na.

γ. — *Classification.*

La classification sera analogue à celle des sols bruns subdésertiques.

On distinguera 2 sous-groupes : à imprégnation calcaire (P5) et à imprégnation gypseuse (P6). Au niveau de la famille : P 5 sur alluvion fluviatile sableuse, P6 sur alluvion éolienne sableuse graveleuse. On distinguera ensuite les séries en fonction de la texture des horizons de surface.

3412. — CLASSE DES SOLS HALOMORPHES

Les sols halomorphes se définissent par **l'ensemble** des caractères suivants : plus de 2 p. 1000 de sels solubles ; conductivité supérieure à 4 mmhos ; efflorescences salines à ClNa à la surface du sol (certains sols peuvent présenter des efflorescences blanchâtres de calcaire ou de sulfates sans être des sols halomorphes). Absence de végétation ou végétation spécialisée de halophytes généralement crassulescents.

On peut distinguer dans le Sud tunisien 2 ordres : les sols salins qui se définissent par un pH < 8,5 et un coefficient $\frac{\text{Na}}{\text{bases échangeables}} < 12$; les sols salins à alcalis qui se définissent par les caractères inverses et par l'état dispersé des colloïdes. On n'a pas encore signalé de solonetz typiques dans le Sud tunisien, à notre connaissance.

B. — ORDRE DES SOLS SALINS (Solontchaks).

a) *Groupe des solontchaks typiques.*

Ce groupe se caractérise par un profil uniforme de type AC. On peut le classer en quatre sous-groupes en fonction de la teneur en chlorures : on obtient ainsi des sols :

très salés (hypersolontchaks) ;
moyennement salés (mésosolontchaks);
faiblement salés (hyposolontchaks, BOULAINE 1957);
salure profonde (cryptosolontchaks, BOULAINE 1957).

On distinguera des familles en fonction de la profondeur de la nappe phréatique et surtout des amplitudes de variations de celle-ci. Ce facteur d'amplitude des oscillations du plan d'eau au cours de l'année semble très important. J. BOULAINE (1957) et surtout G. NOVIKOFF (1958), ont insisté avec raison sur ce point.

La fluctuation de la teneur en chlorures au cours de l'année revêt également une grande importance sur le plan écologique et celui de la mise en valeur. Certains sols se dessalent notablement en surface pendant l'hiver, tandis que d'autres gardent une teneur en sel relativement constante. G. NOVIKOFF (*op. cit.*) a mis en évidence le développement d'une flore thérophytique en liaison avec le lessivage hivernal. Cette végétation éphémère, relativement peu halophile, se superpose alors à une végétation vivace typiquement halophile, liée à la salure constante des horizons profonds et tolérante aux alternances de lessivage et de sursalure des horizons superficiels.

Ces fluctuations dans la teneur en chlorures et de la hauteur du plan d'eau rendent difficile toute classification précise des sols salés dans les termes moyens et inférieurs de la nomenclature, en l'absence d'observations systématiques dans le temps.

α. — *Sous-groupe des sols très salés* (Hypersolontchaks).

Ce sous-groupe se caractérise par une teneur en chlorures (exprimée en NaCl) de l'ordre de 10 p. 100 et plus dans les horizons supérieurs, au cours de la saison sèche. On observe durant celle-ci de gros cristaux de NaCl bien visibles à l'œil nu dans les horizons supérieurs. La surface présente souvent en été une pellicule croutoïde, polygonale, de cristaux de NaCl. Ces sols sont généralement des solontchacks vifs ; c'est-à-dire caractérisés par une migration saisonnière des solutions du sol ; ils occupent la zone centrale des chotts et des sebkhas. Les hypersolontchaks sont presque toujours dépourvus de plantes supérieures sauf, parfois, des peuplements purs et très clairsemés de *Halopeplis amplexicaulis* (Thérophyte).

β. — *Sous-groupe des sols moyennement salés* (méso-solontchaks).

Ce sous-groupe se caractérise par une teneur en chlorures de l'ordre de 1 à 10 p. 100 des horizons supérieurs au cours de la saison sèche. On observe peu de cristaux de NaCl dans le profil ; ils sont très petits et souvent associés au gypse en fins pseudomyceliums. La surface du sol présente en été des efflorescences salines mais jamais de pellicule croutoïde. Ces sols se définissent encore par la présence d'une végétation strictement spécialisée de Salsolacées crassulescentes soit par ordre de salure décroissante :

Halocnenum strobilaceum.

Arthrocnenum indicum.
Salicornia arabica (*Hygrophile*).
Salsola tetrandra.
Salsola tetragona.
Limoniastrum Guyonianum.

on peut trouver aussi des espèces arborescentes ou arbustives du genre *Tamarix* ; notamment *T. pauciovulata* et *T. Boveana.*

Profil P7. — Localisation ; Chott Fedjej, bordure méridionale. Position topographique : large dépression. Altitude ⋕ 40 m. Coordonnées : 9° 2′ 20″ E. × 33° 49′ 47″ N. Surface : légèrement durcie. Efflorescences blanchâtres.

0-10. — Sable moyen à grossier légèrement limoneux ; gypseux ; structure particulaire assez lâche ; frais à légèrement humide ; quelques racines et radicelles. NaCl 5,3 p. 100 ; SO_4Ca2H_2O 20 p. 100 ; calcaire total 7,8 p. 100 ; Humidité équivalente 18 p. 100.

10-30. — Sable moyen peu limoneux ; structure particulaire friable ; humide ; NaCl 2,6 p. 100 ; SO_4Ca2H_2O 34,8 p. 100 ; calcaire total 10,0 p. 100 ; humidité équivalente 21 p. 100.

30-100. — Sable moyen peu limoneux ; structure particulaire serrée ; humide ; friable ; NaCl 0,7 p. 100 ; SO_4Ca2H_2O 25,2 p. 100 ; humidité équivalente 20 p. 100.

Couverture végétale : 20 p. 100. Peuplement pur de *Halocnemon strobilaceum.*

γ. — *Sous-groupe des sols faiblement salés* (Hyposolontchaks, BOULAINE 1957).

Ce sous-groupe se distingue par une teneur en chlorures se situant aux alentours de 0,1 à 1 p. 100 dans les horizons supérieurs et au cours de la saison sèche. Pas de cristaux de NaCl visibles dans le profil. Présence d'une végétation halophile spécialisée souvent associée a des plantes halophiles facultatives ou même à des espèces non spécialisées.

Salsola tetrandra et S. tetragona.
Limoniastrum Guyonianum.
Salsola Sieberi var. vesceritensis.
Salsola vermiculata var. villosa.
Suaeda fructicosa.
Suaeda maritima.
Suaeda mollis.
Aeluropus littoralis.
Sphenopus divaricatus.
Zygophyllum album.
Limonium pruinosum.
Frankenia thymifolia.

δ. — *Sous-groupe des sols à salure profonde* (cryptosolontchaks, Boulaine, 1957).

Ce sous-groupe se caractérise par des horizons supérieurs non ou peu chlorurés surmontant des horizons plus ou moins chargés en NaCl. Ce sont généralement des sols complexes formés par un alluvionnement ancien de solontchaks typiques.

Profil P8 — Situation : Bled Gouifla (entre Gafsa et Tozeur) près oued Mellah.

Exposition N ; pente 2-3 p. 100 ; lat N : 34° 8′ 30″ ; long. E : 8° 19′0″

Végétation : steppe à *Arthrophytum Schmittianum* et *Salsola vermiculata var. villosa* (1). Utilisation : pâturage. Couverture du sol : 70 p. 100. Surface sablonneuse, déflation éolienne.

0-35. — Sable moyen ; structure particulaire lâche ; sec ; nombreuses racines et radicelles ; quelques graviers de 0,2 à 0,5 cm entre 25 et 35 ; couleur 7,5 YR 8/6 ; HCl+.

35-72. — Sable moyen à structure particulaire lâche ; humide ; nombreuses racines et radicelles ; débris d'*Helix* ; couleur : 7,5 YR 7/8 ; HCl+.

72-120. — Limon sableux à sable fin ; structure nuciforme ; nombreux pseudomyceliums gypso-salins ; quelques racines et radicelles ; traces d'humidité ; couleur 7,5 YR 5/8 ; HCl+.

120-180. — Sable fin limoneux ; structure nuciforme serrée ; traces d'humidité ; pas de racines ; très nombreux pseudomyceliums gypso-salins ; HCl : O ; couleur 7,5 YR 4/4.

a) *Groupe des solontchaks à encroûtement.*

Tous les profils que nous avons étudiés dans ce groupe présentaient une salure assez faible de l'ordre de 0,3 à 0,8 p. 100. Ce groupe assure la transition entre les sols salins et les sols hydromorphes à encroûtement gypseux.

Profil P9. — Situation : entre Médenine et Zarzis. Position topographique : bas-fonds, périphérie de Sebkha. Pente très faible. Coordonnées : 33° 26′ 05″N. × 10° 47′ 20″E.

0-60. — Sable fin peu gypseux ; structure particulaire lâche ; humide ; racines, radicelles ; couleur : 5 YR 5/8 (rouge-jaunâtre). Analyse : pH 8,5 ; conductivité : 21 mmhos ; ClNa 0,34 p. 100 ; SO_4Ca2H_2O : 1,62 p. 100 ; calcaire total : 8,5 ; humidité équivalente : 7,9 p. 100.

60-120. — Sable fin gypseux ; humide ; structure particulaire ; racines et radicelles ; couleur : 5 YR 6/4 (brun-rougeâtre clair).

(1) Il s'agit exactement de la sous-association à *Salsola vermiculata* var. *villosa* de l'association à *Arthrophytum Schmittianum* et *Thymelaea microphylla* (Le Houérou, 1959).

P8 — Analyses.

Physiques.

Profondeur	Granulométrie %								Extrait de pâte saturée				Humidité équivalente %	pH
	1000 à 2000 µ	500 à 1000	200 à 500	100 à 200	50 à 100	20 à 50	2 à 20	— de 2 µ	Cl ‰	RS ‰	conduct. mmhos	% de satur.		
0-35	2	6	33	28	17	0	4	10	0,10	1,9	3,2	21,4	7,0	7,7
35-72	1	7	45	23	14	2	2	6	0,71	4,0	6,2	20,8	6,0	7,7
72-120	0	4	8	10	13	34	17	14	6,74	24,0	29,0	16,4	38,0	8,0
120-180	0	5	18	18	13	13	17	16	7,1	24	29	35,8	31,0	7,8

Chimiques.

Profondeur	Milliéquivalents %				% de terre sèche					
	Capacité d'échange			Na % de Tc	CO_3Ca total	CO_3Ca actif	Cl —	SO_4	NaCl	SO_4Ca $2H_2O$
	T	Tcorr	Na							
0-35	4,6	5,0	0,4	8,0	11,5	2,5	0,005	1,4	0,008	2,5
35-72	4,2	4,6	0,3	6,5	10,7	2,0	0,03	0,7	0,05	1,2
72-120	13,0	14,3	7,15	50,0	15,8	13,0	0,39	21,7	0,63	39,0
120-180	12,2	13,4	4,1	30,5	11,8	11,5	0,30	20,9	0,49	37,6

Analyses : pH 8,5 ; ClNa 0,41 p. 100 ; conductivité : 25 mmhos ; SO_4Ca2H_2O : 8,46 p. 100 ; calcaire total : 13,5 p. 100 ; humidité équivalente : 10,5 p. 100.

120-140. — Sable fin à encroûtement de gypse pulvérulent avec quelques cristaux ; humide ; racines et radicelles ; couleur : 5 YR 8/4 (blanc rosé).
Analyses : pH 8,3 ; ClNa 0,26 p. 100 ; conductivité : 19 mmhos ; calcaire total : 10 p. 100 ; SO_4Ca2H_2O : 28 p. 100 ; humidité équivalente : 32 p. 100.

140-205. — Sable fin gypseux, humide à gorgé d'eau ; nappe à 190 ; traces grisâtres d'hydromorphie ; couleur : 7,5 YR 7/4 (gris-rosé).
Analyses : ClNa 0,23 p. 100 ; conductivité : 18 mmhos ; SO_4Ca2H_2O : 15 p. 100 ; calcaire total : 9,4 p. 100 ; humidité équivalente : 9,4 p. 100.

Végétation : association à *Nitraria retusa, Suaeda mollis* et *Salsola vesceritensis* (LE HOUÉROU ; 1956, 1959).

α. — *Interprétation.*

Il y a incontestablement un horizon encroûté au-dessus de la nappe (120-140) ; l'encroûtement est formé de gypse par évaporation de la nappe. Il est à noter que le taux de chlorures diminue en profondeur. P. DESSUS a décrit des profils analogues dans la Nefzaoua (1948) avec des taux de chlorures de 0,3 à 0,6 p. 100. Il semble donc que ces sols salins à encroûtement ne prennent naissance que dans les sols peu salés à partir d'une nappe phréatique et d'un matériau sableux riche en gypse au départ.

β. — *Classification.*

Ce groupe peut se subdiviser en familles, séries et types suivant le même schéma que le groupe typique d'après le taux de salure, la profondeur, l'épaisseur et la nature de l'encroûtement et la texture des horizons de surface.

P9 serait à classer :

— Groupe des sols salins encroûtés.
 — Sous-groupe des sols peu salés (hyposolontchaks encroûtés).
 — Famille à encroûtement gypseux.
 — Série à encroûtement profond.
 — Type à texture sableuse moyenne à fine.

C. — ORDRE DES SOLS SALINS A ALCALIS

On distingue les sous-groupes des sols salins à alcalis fortement salés, moyennement salés et faiblement salés.

a) *Groupe des sols salins à alcalis faiblement salés.*

Profil P10. — Situation : Sebkha entre Gafsa et Metlaoui. Fond de cuvette ; altitude 180 m ; pente très faible. Coordonnées : 34° 21' 40''N. × 8° 37'55''E.

0-100. — Surface en glacis, squameux par places ; sable fin limono-argileux à structure particulaire assez lâche ; humide ; racines et radicelles ; couleur : 5 YR 5/6 (rouge-jaunâtre). Analyses : pH : 8,6 ; conductivité : 40 mmhos ; ClNa : 0,98 p. 100 ; SO_4Ca2H_2O : 7,73 p. 100 ; calcaire total : 11,7 p. 100 ; capacité échange : 8,4 mill. équ. ; $\frac{\text{Na}}{\text{bas. éch.}}$: 33,3 p. 100 ; humidité équivalente : 16,2.

Végétation : Association à *Arthrocnemum glaucum* (Long, 1954).

Ce profil est à la limite des sols salins à alcali faiblement salés et des sols salins à alcalis moyennement salés.

b) *Groupe des sols salins à alcalis moyennement salés.*

Ce groupe assez commun dans la Tunisie centrale (région de Kairouan) semble plus rare en Tunisie du Sud. Il se caractérise par une quantité de chlorure supérieure à 1 p. 100, un pH élevé, une texture moyenne à fine, au moins en profondeur et un coefficient $\frac{\text{Na}}{\text{b. éch}}$. généralement supérieur à 30.

3413. — CLASSE DES SOLS HYDROMORPHES

Les sols hydromorphes sont représentés en Tunisie méridionale par des sols à encroûtement, des sols tirsifiés, rarement par des gleys.

A. — Ordre des sols a encroûtement de nappe.

Les sols hydromorphes à encroûtement peuvent à leur tour se diviser en deux groupes selon le mode de formation de l'encroûtement et sa nature ; on distingue ainsi les sols à encroûtements calcaires de nappe et à encroûtements gypseux ; seuls ces derniers semblent représentés dans le Sud tunisien.

a) *Groupe des sols à encroûtement gypseux.*

α. — *Sous-groupe des encroûtements typiques.*

Ces sols se forment au-dessus d'une nappe phréatique permanente à partir d'un matériau déjà riche en gypse. Plusieurs profils décrits par P. Dessus et J. Gelpe dans le Nefzaoua sont à rapporter à ce groupe, voici un profil que nous avons étudié dans la région de Douz.

Profil P11. — Situation : altitude 60 m, exposition nord, pente 12 p. 100 Coordonnées : 33° 29'30''N × 8° 59'45''E. Surface : buttes sablonneuses éoliennes ; couverture végétale 60 p. 100.

0-20. — Sable fin éolien ; structure particulaire lâche ; couleur 10 YR 8/3 (brun rosé pâle) ; NaCl 0,07 p. 100 ; So_4Ca2H_2O 10 p. 100.

20-45. — Sable fin gypseux avec concrétions de gypses pulvérulent et de calcaire ou « Ras Kelb » et « Deb-Deb » ; structure particulaire serrée ; couleur : 5 YR 7/3 (gris-clair) ; NaCl : 0,11 p. 100 ; SO_4Ca2H_2O : 35 p. 100.

45-150. — Sable fin gris très clair avec des traînées jaune-verdâtre et rouille clair ; humide ; structure particulaire serrée ; couleur 5 YR 8/3 ; 5 Y 6/4 + 5 7 7/6 ; NaCl : 0,14 p. 100 ; SO_4Ca2H_2O 13 p. 100.

150-180. — Sable fin à Deb-Deb (concrétions gypseuses) ; couleur gris à traînées rouille clair et jaune-verdâtre ; couleurs au code 5 Y 8/3 > 5 Y 6/4 + 5 Y 7/6 ; NaCl : 0,18 p. 100 ; SO_4Ca $2H_2O$ 44,6 p. 100.

180-260. — Sable fin gypseux gris bariolé de traînées rouille et vert olive : 5 YR 8/3 > 5 Y 6/4 + 5 Y 7/6 ; NaCl : 0,12 p. 100 ; SO_4Ca2H_2O : 15 p. 100.

260-280. — Sable fin gypseux avec nombreuses concrétions de 5 à 15 cm de long sur 5 cm de diamètre ; couleur gris-verdâtre 5 Y 6/4 ; nappe à —270 ; NaCl : 0,09 p. 100 ; SO_4Ca2H_2O 53,2 p. 100.

Végétation : Association à *Arthrophytum Schmittianum*, *Traganum nudatum* et *Suaeda mollis* (Le Houerou, 1959).

On notera que les 3 horizons encroûtés sont probablement liés à des niveaux d'abaissement progressif de la nappe.

Ce profil serait à classer :

— Ordre des sols à encroûtement de nappe.
 — Groupe à encroûtement gypseux.
 — Famille à gypse pulvérulent.
 — Série à encroûtements profonds.
 — Type à texture grossière.

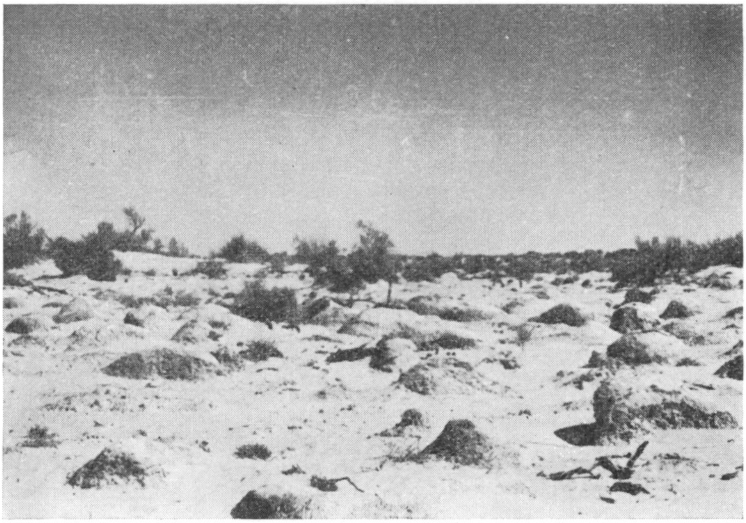
Les encroûtements peuvent aussi être calcaires mais le cas est ici très rare.

β. — *Sous-groupe des encroûtements de nappe à intumescences.*

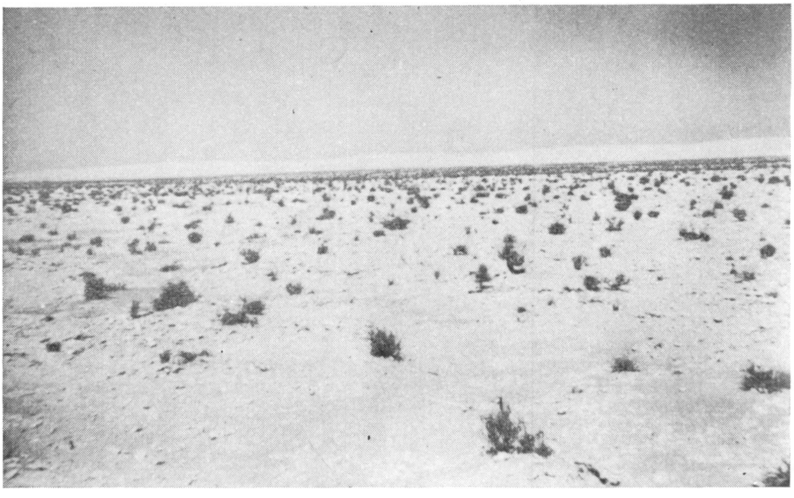
Profil P12. — Ce type d'encroûtement est original : il se produit toujours à la surface du sol par formation d'intumescences gypseuses ressemblant à de gros champignons. Ces intumescences prennent naissance le long des racines de certaines espèces végétales, en particulier de *Limoniastrum*

Guyonianum. Il semblerait donc que l'évaporation à partir de la nappe le long des grosses racines et du collet de ces plantes provoque ce dépôt de gypse.

Au bout d'un certain temps, ces intumescences se délitent d'elles-mêmes. On trouve sous les intumescences un encroûtement continu, friable, surmontant un sable gypseux. La nappe est peu profonde (1 à 3 m). Les intumescences peuvent être nombreuses et serrées et donner



Encroûtement gypseux à intumescences sur nappe. cf : P. 12.



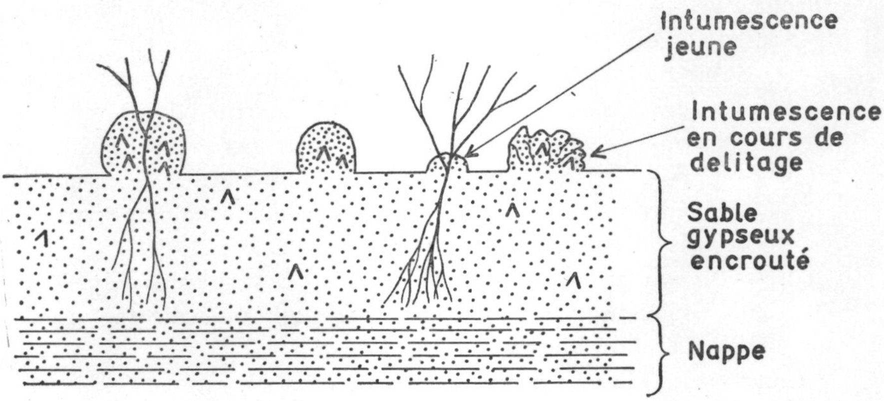
Carapace gypseuse de transport.
Localisée dans les bas-fonds sahariens et plus ou moins déchiquetée par la corrasion.

l'aspect de gros pavés mal joints ; elles ont 10-30 cm de haut sur 20 à 50 cm de diamètre et présentent toujours une consistance assez friable. Elles se délitent par craquelure de la surface et fentes.

Ces sols se rencontrent au sud du Chott Djerid dans la région de Redjem Maatoug.

Ils peuvent se classer de la façon suivante :

— Ordre des sols à encroûtement de nappe.
 — Groupe à encroûtements gypseux.
 — Sous-groupe à intumescences.



B. — Ordre des sols a croûte ou carapaces de bas-fonds

a) *Groupe à croûte gypseuse de transport.*

Ce type de croûte est formé par transport de ruissellement et accumulation après évaporation dans les bas-fonds. Nous n'avons jamais observé ce type de croûte en dehors de la zone saharienne. La croûte est toujours en surface : elle est formée de gypse pulvérulent fortement aggloméré en un grès assez dur, vibrant, présentant une structure caverneuse. La surface de la croûte est souvent déchiquetée par la corrasion. Cette croûte peut être très épaisse (jusqu'à 1-2 m) ; elle surmonte toujours des alluvions fluviatiles. Le mécanisme de sa formation peut s'expliquer de la façon suivante ; lors de gros orages, l'eau ruisselle sur les regs à gypse pulvérulent et s'amasse dans les grandes dépressions fermées où l'évaporation laisse un mélange de gypse et de sable qui en se cimentant constituent le grès caverneux de la croûte.

Nous avons observé cette croûte dans les régions de Djeneien, M'Chiguig et Rhadamès. Cette formation est contemporaine et n'a jamais encore été signalée, à notre connaissance.

L'association à *Anarrhinum brevifolium* et *Oudneya africana ssp. zygarrhena* constitue un réactif fidèle à cette formation pédologique.

C. — Ordre des Tirs

a) *Groupe des sols tirsifiés.*

Le groupe des sols tirsifiés semble assez rare dans le Sud tunisien. J'ai pu en observer dans la région de Gabès ; A. Fournet (1958) en a signalé depuis dans la région de Gafsa.

Voici un profil étudié dans la région de Gabès en bordure de l'Oued El Hachane. Il s'agit, en réalité, d'un sol complexe : alluvion (0-130) sur sol tirsifié (130-200).

Profil P13. — Position topographique : thalweg ; exposition sud ; pente 2 p. 100 ; Localisation : 37$^{gr.}$ 59′ 00″N × 8$^{gr.}$ 60′ 80″E.

0-130. — Sable fin peu limoneux très peu gypseux ; nombreux pseudo-myceliums calcaro-gypseux ; structure particulaire à tendance nuciforme ; racines, radicelles ; couleur ocre-rosé ; HCl^+.

130-160. — Limon gris-noirâtre ; structure nuciforme à tendance polyédrique ; nombreux pseudomyceliums calcaro-gypseux ; débris d'Helix ; HCl^+.

150-200. — Limon argileux gypseux noirâtre à structure polyédrique très anguleuse ; quelques pseudomyceliums calcarogypseux ; HCl^+ ; grosses racines.

Végétation : *Nitraria retusa, Suaeda mollis* [1].

D. — Ordre des Gleys

a) *Groupe des Gleys profonds.*

Ce groupe de sols est assez rare dans le Sud tunisien et toujours localisé au bord des mares perennes, de sources, etc.

Voici un profil étudié dans une zone sub-marécageuse au nord-ouest de Gafsa à Oum el Ksob près de Bir el Ater. Coordonnées 34° 42′ 30″N × 8° 22′ 04″E ; exposition nord ; pente 0,5 p. 100.

Profil P14. — Débris organiques non décomposés en surface.

0-60. — Sable grossier humide ; structure particulaire ; nombreux pseudo-myceliums gypseux ; couleur 7,5 YR 6/4 (brun-clair).

60-95. — Limon argileux à structure fondue ; très humide ; nappe à 80 ; couleur brun-ocre avec des traînées grises verdâtres ; 5 YR 5/4 > 2,5 Y 6/2 (gris-verdâtre clair) ; pseudo-myceliums gypseux à la partie supérieure.

Végétation [1] : *Juncus maritimus, Juncus acutus, Scirpus holoschœnus, Phragmites pungens, Lygeum spartum,* couverture 80 p. 100.

N. B. — Ce profil pourrait également se classer comme sol brun subaride à Gley.

[1] La position phytosociologique de cette végétation n'a pas encore pu être précisée.

342. — **Etage des sols non évolués.**

3421. — CLASSE DES SOLS BRUTS NON CLIMATIQUES (azonaux).

A. — Ordre des sols d'apport

a) *Groupe des apports fluviatiles.*

Les sols d'apport fluviatile se divisent en deux familles : les colluvions et les alluvions.

Les colluvions sont évidemment de nature variable selon la nature lithologique des substrats dont ils proviennent. On les classe en fonction de leur chimisme, de leur teneur en cailloux et graviers, puis en fonction de leur profondeur et de leur texture.

Les alluvions sont de nature encore plus variables ; on y trouve des successions d'horizons de caractères très différents, on les classe en fonction de leur chimisme général, de leur texture.

De façon générale les colluvions et alluvions de la Tunisie méridionale sont riches en calcaire (pH presque toujours supérieur à 7,5) parfois en gypse.

Ils sont généralement profonds et de texture grossière à moyenne. Les textures fines sont assez rares, contrairement à ce qui se passe en Tunisie centrale. L'évolution normale de ces alluvions et colluvions est lente ; elle tend à former des sols bruns subdésertiques à nodules calcaires ou gypseux.

b) *Groupe des sols d'apport éolien.*

α. — *Sous-groupe des voiles sablonneux.*

Ces alluvions éoliennes sont formées de dunes ou de placages sablonneux qui peuvent recouvrir toutes sortes de substrats. Ces alluvions éoliennes sont particulièrement abondantes, dans la partie méridionale de la Djeffara : Tatahouine — Ben Gardane - Zarzis - Médenine où elles recouvrent généralement des croûtes calcaires ou gypseuses quaternaires. Elles abondent également dans les basses plaines occidentales des régions de Metlaoui — Gouifla. Elles sont généralement fixées par la végétation et constituent les steppes sableuses [1] à *Rhantherium suaveolens* (Djeffara) ou à *Arthrophytum Schmittianum* (basses plaines occidentales).

β. — *Sous-groupe des dunes.*

Les dunes se localisent le long des oueds ou en périphérie de Sebkhas dans la zone non saharienne.

[1] Comprenant plusieurs associations végétales où dominent les deux espèces citées.

γ. — *Sous-groupe de Nebkas.*

Les Nebkas sont formées par accumulation éolienne autour d'un végétal qui s'exhausse au fur et à mesure que le sable s'amoncelle. On peut distinguer les Nebkas en fonction du végétal qui leur donnent naissance :

Nebkas à Jujubier *(Ziziphus Lotus)*.

Nebkas à *Nitraria retusa*.

Nebkas à Tamarix, etc.

Le végétal support est fonction de la nature du sol originel avant l'édification de la Nebka.

Ainsi les Nebkas à Jujubier naissent sur des sols sablonneux. Les Nebkas à *Nitraria retusa* naissent sur des sols riches en sulfates. Les Nebkas à *Limoniastrum* s'édifient sur un substrat salé, etc.

B. — Ordre des sols d'érosion fluviatile

a) *Groupe des lithosols.*

Les lithosols sont localisés sur les Djebels ; ils sont formés de sable fin plus ou moins limoneux couvrant par place (sous les touffes de végétation) un substrat géologique érodé. Le caractère dominant est leur richesse en matières organiques, voici un profil étudié dans les Matmatas aux environs de Toujane.

Profil P15. — Exposition N, pente 40 p. 100 ; affleurement de la roche mère (calcaire Cénomanien) 70 p. 100 ; altitude 430 m. Coordonnées : $33^{o}\ 28'\ 05''N \times 10^{o}\ 07'\ 00''E$.

0-2. — Litière de feuilles d'alfa.

2-15. — Sable fin limoneux à structure particulaire assez lâche ; nombreuses radicelles ; terriers d'insectes ; couleur 7,5 YR 5/2 (brun) ; cailloux calcaires de 10 à 15.

15 et au-delà. — roche-mère calcaire.

Analyses 2-15 : matières organiques 5,8 p. 100 ; capacité d'échange 10,4 p. 100 ; calcaire total 12 p. 100.

Végétation : Alfa, Romarin (1) ; la présence de l'horizon de sol est étroitement lié à la présence de la végétation, plus précisément de l'Alfa ; le départ de l'Alfa entraîne la dénudation de la roche-mère donc la disparition du « sol ».

a) *Groupe des régosols.*

Ce sont des sols d'érosion sur roche-mère meuble, par exemple : marnes, loess, etc... Ils sont très rares ; les roches meubles étant généralement la proie d'une érosion intense, il ne peut s'y développer de sol, la végétation est elle-même emportée par l'érosion.

(1) Association à *Genista microcephala* et *Teucrium Alopecurus*. (Le Houérou, 1959).

α. — *Sous-groupe des loess érodés* (Loess Sirozem, Kubiena, 1953).

Cependant, dans la région des Matmatas une roche particulière constituée d'un loess calcaro-gypseux a donné naissance à des sols extrêmement érodés, en ravines (gulley-érosion). L'âge de ces loess n'est pas connu de façon précise ; on peut cependant affirmer qu'ils sont du quaternaire récent car ils ne sont jamais encroûtés, alors qu'ils peuvent recouvrir des croûtes gypseuses du quaternaire moyen ou récent. Ces loess se retrouvent dans le Djebel libyen jusqu'au bord de la grande Syrte.

Ces loess présentent un profil homogène d'épaisseur variable (pouvant atteindre 20 m). Les principales particularités en sont : l'absence de poupées ; la présence d'une quantité variable de gypse pulvérulent ou parfois finement cristallisé qui donne à ces sols une certaine compacité à l'état sec et un aspect gras « savonneux » à l'état humide. Ces sols se retrouvent abondamment dans le Djebel tripolitain depuis Nalout jusqu'à Homs. Ils servent souvent d'asile aux hommes troglodytes de ces régions.

Voici un profil étudié dans la région de Ksar Techine au sud-ouest de Matmata.

Profil P16. — Exposition ouest, pente 3 p. 100 ; couverture végétale 40 p. 100 ; altitude 450 m ; coordonnées : $33^{0} 30' 10''$N × $9^{0} 50' 00''$E. Surface en glacis colmaté. Steppe à chaméphytes couvrant 60 p. 100 de la surface du sol (Ass. à *Lygeum spartum, Rhaponticum acaule* et *Helianthemum ruficomum*, Le Houerou, 1959).

0-300. — Sable fin limoneux légèrement gypseux (gypse pulvérulent) ; structure nuciforme serrée ; quelques nodules calcaires assez durs répartis dans la masse ; couleur 5 YR 6/6 (jaune-rougeâtre) ; quelques fins cristaux de gypse ; terre grasse au toucher à l'état humide ; consistance ferme à l'état sec.

Analyses (cf. tableau).

Ce loess, profondément raviné produit des colluvions et alluvions que l'on retrouve dans les terrasses d'oueds très loin dans la Djeffara, comme le montrent les courbes granulométriques. Lorsqu'ils ne sont pas érodés ces loess donnent naissance à des sols bruns subdésertiques à nodules.

Classification (1) :

— Classe des sols bruts non climatiques.

— Ordre des sols d'érosion fluviatile.

— Groupe des régosols.

(1) Ce sol pourrait fort bien se classer autrement en faisant passer le caractère de « Loess » avant celui de « Sol brut érodé ». Cette dernière conception paraît plus normale pour l'écologiste ou l'agronome, bien que moins « pédogénétique ».

Profil N° 16.

Analyses physiques.

Profondeur	Granulométrie								Extrait de pâte saturée			Humidité équivalente %
	STG	SG	S $^1/_2$ G	S $^1/_2$ F	SF	STF	L	Coll. Min.	pour 1 000	conductivité mmhos	% saturation	
	2000 à 1000 μ	1000 à 500 μ	500 à 100 μ	200 à à 100 μ	100 à 50 μ	50 à 20 μ	20 à 2 μ	— de 2 μ	RS			
0 — 300	0	0	1	10	44	15	24	6	3,8	2,8	32	13

Analyses chimiques.

Profondeur	Milliéquivalents % — Capacité d'échange		% terre sèche						
	T	Tcorr	CO_3Ca total	CO_3Ca actif	Cl	SO_4	pH	SO_4 Ca $2H_2O$	ClNa
0 — 300	10,2	11,2	25	13	0,005	2	8,1	3,6	0,008

— Sous-groupe des loess érodés.
— Famille des loess calcaro-gypseux.
— Série à profil puissant.

3422. — CLASSE DES SOLS BRUTS CLIMATIQUES

A. — Ordre des sols désertiques

Ce sont des sols où les processus de désagrégation, d'ablation et de transport prédominent sur les processus d'altération. L'agent principal de formation de ces sols est le vent. L'on distingue donc 3 groupes en fonction de l'action du vent :

— sols bruts non soumis à l'action du vent ;
— sols bruts d'ablation ;
— sols bruts d'accumulation.

a) *Groupe des sols non soumis à l'action éolienne.*

Il s'agit de roches-mères se désagrégeant sur place en gros éléments dans les interstices et les diaclases desquels les phénomènes d'altération et de désagrégation peuvent produire des éléments de dimension plus petites protégés de l'ablation éolienne. On peut ainsi distinguer les « Hamadas » et les « Regs » de dissociation à gros éléments.

α. — *Sous-groupe des Hamadas.*

Les Hamadas sont des surfaces structurales formées de dalles larges et plates produites par la dislocation d'une roche-mère dure dans les interstices des dalles, à l'abri du vent, peut se former un sol brut squelettique.

β. — *Sous-groupe des Regs de dissociation.*

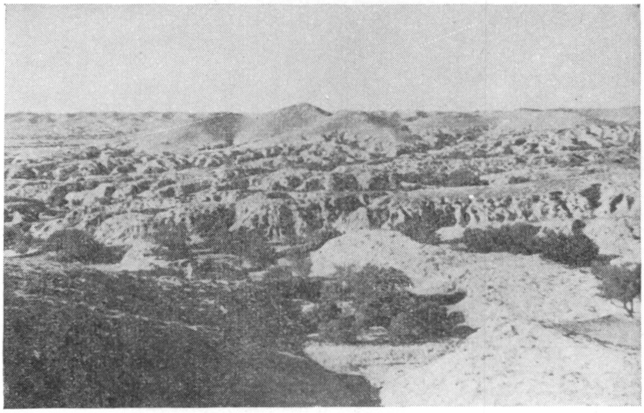
La dissociation d'une roche-mère moins dure donne des cailloux de dimension moyenne sous lesquels, à l'abri du vent peut se poursuivre la désagrégation de la roche-mère. Ce sous-groupe est localisé dans l'extrême sud et principalement au sommet des « gours ».

b) *Groupe des sols d'ablation éolienne* (*Regs d'ablation*).

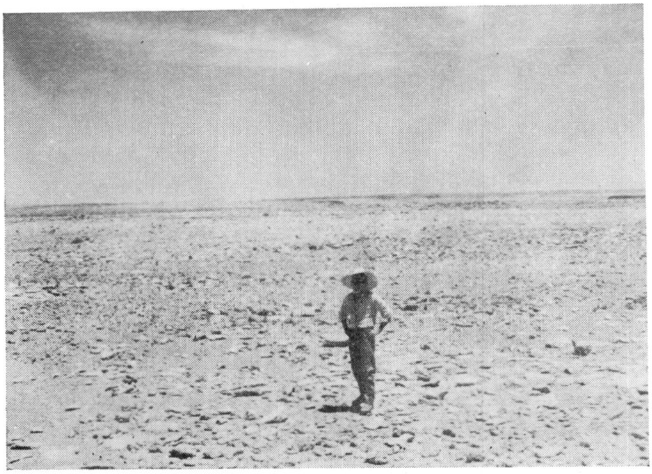
Ce sont les regs, on peut distinguer les regs autochtones et les regs allochtones.

α. — *Sous-groupe des regs autochtones.*

Les regs autochtones se forment par désagrégation sur place d'une roche-mère tendre (calcaire crayeux, marnes, etc.). Les produits de désagrégation sont plus ou moins fins et plus ou moins emportés par le vent au fur et à mesure de leur formation.



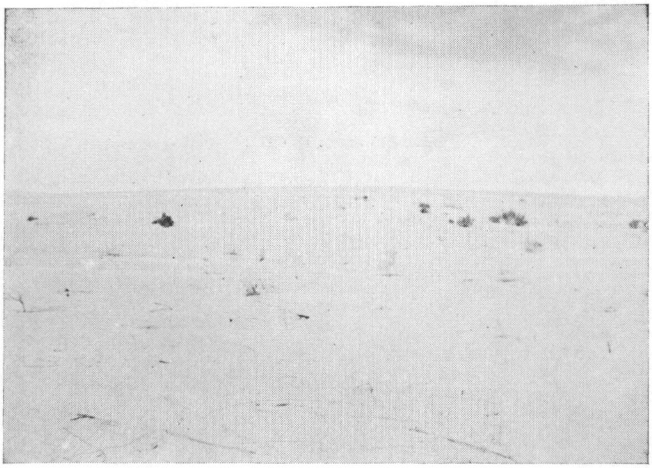
Sol de loess érodé dans les Matmata.



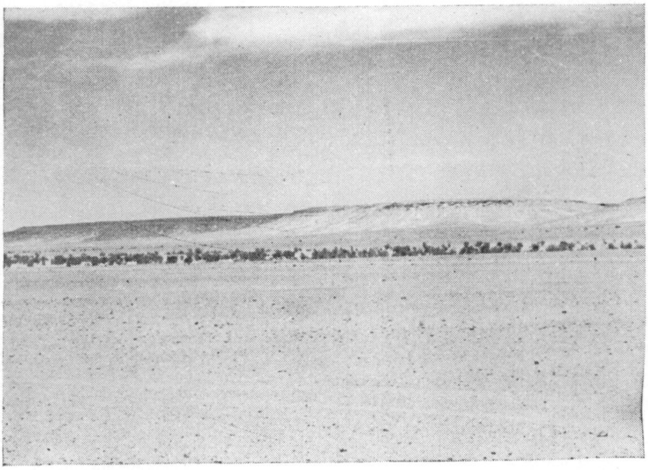
Hamada dans l'extrême sud.



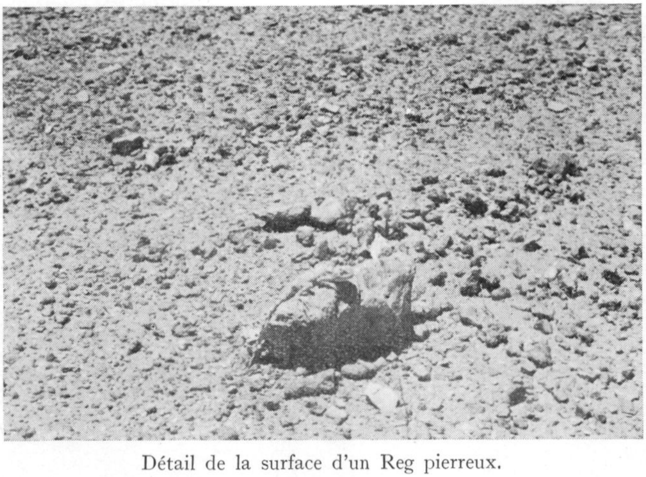
« Champ de Barkhanes » dans la région de Djeneien.



Reg sableux au N. de Fort-Saint.



Reg de la région de M[illegible]iguig.



Détail de la surface d'un Reg pierreux.

β. — *Sous-groupe des regs allochtones.*

Les regs allochtones sont formés à partir d'alluvions fluviatiles repris par l'érosion éolienne, on trouve en surface les particules les plus grossières ; généralement les sables très grossiers et des cailloutis puis les particules plus fines.

On peut distinguer les regs sableux et les regs pulvérulents.

\+ *Famille des regs sableux.*

Comme le nom l'indique, ils sont formés de sables d'origine fluviatile (alluvions quaternaires) d'où les éléments les plus fins ont été emportés par l'action du vent. Profil de reg sableux étudié aux environs de Djeneien.

Profil P17. — Exposition Ouest, pente 2 p. 100, altitude 380 m ; coordonnées : 31° 47′40″N × 10° 15′ 45″E. Surface : nombreux graviers calcaires et silex le tout couvrant 90 p. 100.

0-10. — Sable grossier ; racines concrétionnées ; structure particulaire assez lâche ; 15 p. 100 de gravier calcaire ; couleur 7,5 YR (rouge-jaunâtre).

10-60 et au-delà. — Sable fin à éléments grossiers ; structure particulaire assez lâche (serrée par endroits) ; quelques minces lits de graviers ; quelques racines concrétionnées (calcaire) ; couleur 5 YR 6/8 (jaune-rougeâtre).

Végétation : steppe à *Haloxylon scoparium var. scoparium* [1]. On peut distinguer des séries d'après la profondeur et des types d'après la texture.

×. — *Famille des regs pulvérulents.*

Le reg pulvérulent est constitué de gypse ou de calcaire pulvérulent, rarement de sulfate de soude, plus ou moins mélangés à du sable. La structure est toujours vacuolaire, soufflée, extrêmement lâche : c'est le *Fech-Fech* des conducteurs sahariens.

On distingue la série des regs pulvérulents calcaires de la série des regs pulvérulents gypseux.

Profil P18 (reg pulvérulent calcaire). Localisation : entre Bir Zar et M'Chiguig ; exposition ouest ; pente 1 p. 100 ; thalweg d'un oued mort ; altitude, coordonnées : 31° 07′ 05″N × 10° 14′ 20″E.

Surface. — Graviers de petite taille et silex légèrement aggloméré

0-2. — par un ciment sableux très friable.

2-20. — Sable fin très calcaire à nombreux graviers et cailloux calcaires et silex ; structure vacuolaire, boursouflée ; couleur 5 YR 6/6 (jaune-rougeâtre).

[1] A rattacher à l'association à *Gymnocarpos decander* et *Anthyllis sericea var. Henoniana* (LE HOUÉROU, 1959).

Profil n° 18.

Analyses physiques.

Profondeur	Granulométrie								Extrait de pâte saturée				Humidité équivalente %
	STG	SG	S 1/2 G	S 1/2 F	SF	STF	L	Coll. Min.	pour 1 000		Conductivité mmhos	% Saturation	
	2 000 à 1 000 μ	1000 à 500 μ	500 à 200 μ	200 à 100 μ	100 à 50 μ	50 à 20 μ	20 à 2 μ	— de 2 μ	CL-	RS			
2 — 20	2	1	2	33	50	5	2	5	0,17	0,45	0,8	29,6	6,0
20 — 30	3	2	4	29	40	9	5	8	0,88	2,3	3,8	32,4	9,6
30 — 50	1	2	2	35	49	3	4	4	0,71	1,3	2,4	30,8	

Analyses chimiques.

Profondeur	Milliéquivalents %				% terre sèche						
	Capacité d'échange			Na % de Tc	CO_3 Ca Total	CO_3 Ca actif	Cl	SO4	pH	SO_4 Ca $2H_2O$	ClNa
	T	Tcorr	Na								
2 — 20	5,8	6,3	0,3	4,8	9,4	2	0,01	0,4	8,6	0,7	0,016
20 — 30	4,9	5,3	0,3	5,7	23,4	5,5	0,04	0,5	8,3	0,9	0,064
30 — 50					15,3		0,02				0,032

20-30. — Sable fin à calcaire pulvérulent ; structure vacuolaire ; cailloux calcaires durs roulés ; couleur 7,5 YR 7/4 (gris-rosé).

30-50. — Sable fin à graviers et cailloux calcaires roulés ; calcaire pulvérulent ; structure vacuolaire ; 7,5 YR 7/4 (gris-rosé).

Végétation : association à *Salsola zygophylla* et *Traganum nudatum var. microphyllum* (LE HOUÉROU, 1959).

Analyses profil P18 (cf. tableau).

c) *Groupe des sols bruts climatiques d'accumulation.*

Les accumulations des sables peuvent se faire de plusieurs manières. On distingue donc les sous-groupes suivants :

Voiles et placages.

Micro-dunes formées derrière des végétaux (non fixées).

Nebkas (dunes fixées par un arbuste).

Barkhanes (dunes en croissant, mobiles).

Cordons dunaires généralement liées à un squelette de « gours » et dont les interférences forment les dunes pyramidales ou Oghourds.

Chaque sous-groupe peut se classer en familles en fonction de la nature du substrat : rocheux, alluvial, etc., en séries d'après l'épaisseur du voile ou la taille des dunes, en types d'après la granulométrie du sable.

La distinction de ces types est rendue nécessaire par l'étude de la végétation. Celle-ci se montre, en effet, très sensible à la profondeur du sable et à sa granulométrie.

L'association *Cornulaca monacantha* et *Ephedra alata ssp. alenda*, par exemple, est inféodée aux cordons dunaires et voiles épais à granulométrie très grossière, voire graveleuse.

343. — **Etage des paléosols.**

Les paléosols se sont différenciés au cours du Quaternaire, généralement au cours des périodes pluviales. On peut distinguer les paléosols évolués des paléosols non évolués.

343-1. — SOUS-ÉTAGE DES PALÉOSOLS ÉVOLUES

Ceux-ci comprennent essentiellement en Tunisie méridionale des paléosols calcimorphes et hydromorphes.

3431. — CLASSE DES PALÉOSOLS CALCIMORPHES

Les paléosols calcimorphes peuvent se distinguer à leur tour en deux sous-groupes : les paléosols calcimorphes typiques à CO_3Ca et les paléosols gypsomorphes. Les paléosols calcimorphes (s. l.) sont parfois confondus avec les sols gris subdésertiques.

A. — Ordre des paléosols calcimorphes typiques

Ils représentent essentiellement les croûtes calcaires dites zonaires qui peuvent être d'âge Villafranchien ou Tensiftien.

Profil P19. — Étudié entre Mareth et Médenine. Altitude 80 m. Coordonnées 37gr. 26′ 95″N × 8gr. 87′ 05″E.

0- 8. — Surface colmatée couverte à 80 p. 100 de cailloux arrondis (débris de croûtes roulés). Sable fin limoneux à structure nuciforme ; racines, radicelles ; couleur 5 YR 6/6 (jaune-rougeâtre) ; HCl^{++}.

8-30. — Croûte calcaire en dalles (1), fissurée, constituée de gros éléments larges et plats à cassure rubannée ; éléments de la dalle reliés par du sable fin limoneux et des nodules calcaires ; racines, radicelles ; HCl^{++} ; couleur extérieure des éléments de dalle 5 YR 7/4 (blanc-rosâtre = saumon), cassure brune.

30-60. — Limon très sableux à sable fin très calcaire ; structure nuciforme serrée ; sec ; nombreux nodules calcaires assez tendres ; quelques racines ; couleur 5 YR 7/6 (jaune-rougeâtre).

60-82. — Argile à structure polyédrique ; très nombreux nodules calcaires farineux ; quelques racines ; HCl^{++} ; couleur 2,5 YR 5/8 rouge.

82-120. — Argile à gypse finement cristallisé avec des concrétions à roses des sables vers le bas ; sec ; HCl : 0 ; couleur 5 YR 7/2 (gris-rosé).

Analyses P19 (cf. tableau).

D'après Durand (1953, 1959 etc...) l'absence d'éléments clastiques et le fait que les éléments de la dalle calcaire présentent une cassure rubannée implique que la croûte se soit formée au contact de l'air ; peut-être par ruissellement sur un matériau déjà enrichi en calcaire « per ascensum » (2). On notera la pauvreté en calcaire dans la couche 82-120. Le fait que le taux de calcaire actif soit supérieur au calcaire total est dû à la perturbation par le gypse de ce dosage. La croûte s'est formée sur un glacis d'érosion très probablement en fin de pluvial Tensiftien (cf. géologie supra).

Cette croûte a pu être localement alluvionnée ou, au contraire érodée, on observe parfois deux horizons à dalles zonaires superposées séparées par 40 à 100 cm de sable fin brun-rouge. La croûte inférieure est alors Villafranchienne. Le sable rubéfié de la surface est d'âge plus récent.

(1) Correspond très probablement au « Tikfert zonaire » de J. Boulaine (1957, p. 504).

(2) La théorie, désormais classique, de Durand ne semble pas pouvoir rendre compte de toutes les formations de croûte : en particulier dans les cas où existent des cassures rubannées à la face inférieure de la dalle. Il s'agit peut-être alors d'alternances de dissolution et de recristallisations au contact d'une surface de discontinuité texturale donc de différence de perméabilité. Phénomène qui se retrouve dans certaines cuirasses ferrugineuses et certains alios.

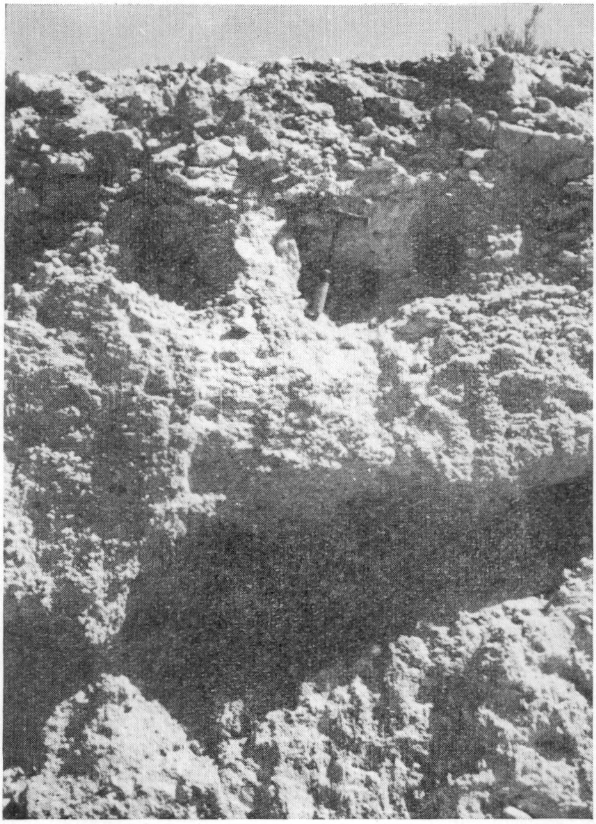
Profil N° 19.

Analyses physiques.

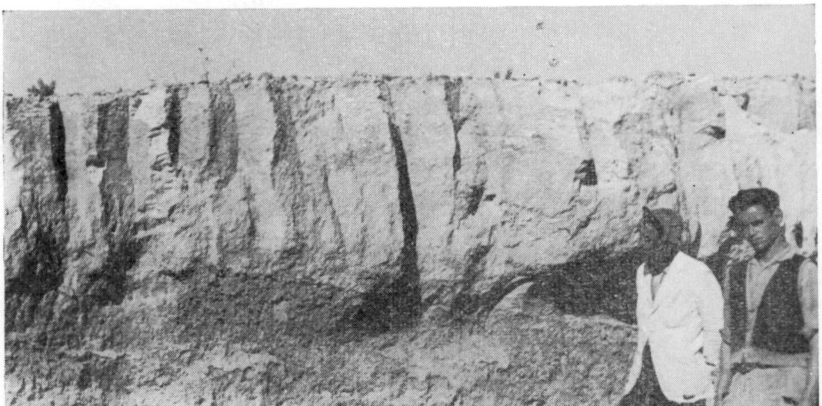
Profondeur	Granulométrie								Extrait de pâte saturée				Humidité équivalente %
	STG	SG	S 1/2 G	S 1/2 F	SF	STF	L	Coll. Min.	pour 1 000		conductivité mmhos	% de saturation	
	2 000 à 1 000 μ	1 000 à 500 μ	500 à 200 μ	200 à 100 μ	100 à 50 μ	50 à 20 μ	20 à 2 μ	— de 2 μ	Cl —	RS			
0 — 8	1	1	1	10	50	13	8	16	0,17	0,31	0,56	34,2	11,0
8 — 30	6	4	5	9	37	16	14	9	1,24	3,2	5,0	38,4	16,0
30 — 60	1	1	2	8	31	17	19	21	15,62	31,0	37,0	37,4	25,0
60 — 82	1	1	2	5	26	38	10	17	1,24	3,7	5,8	43,8	20,0
82 — 180	9	11	13	11	12	Gypse			0,71	2,1	3,5	33,8	27,0

Analyses chimiques.

Profondeur	Milliéquivalents %				% terre sèche						
	Capacité d'échange			Na % de Tc	CO_3 Ca total	CO_3 Ca actif	Cl	SO_4	pH	SO_4Ca 2 H_2O	Cl Na
	T	Tcorr	Na								
0-8	8,5	9,3	0,6	6,5	19,6	1,5	0,005	Tr.	8,3	Tr	0,008
8-30	6,5	7,1	0,5	7,0	44,7	15,0	0,04	0,2	8,2	0,3	0,008
30-60	5,5	6,0	0,7	11,7	47,6	18,0	0,53	0,4	8,3	0,7	0,860
60-82	7,6	8,3	0,8	9,7	46,8	13,5	0,03	0,8	8,4	1,4	0,050
82-180	3,9	4,2	3,8	90,0	6,0	11,5	0,01	33,3	7,9	59,4	0,016



Croûte calcaire à dalles rubannées. cf : P. 19.



Encroûtement gypseux pavimenteux noter l'assise palissadique). cf : P. 19.

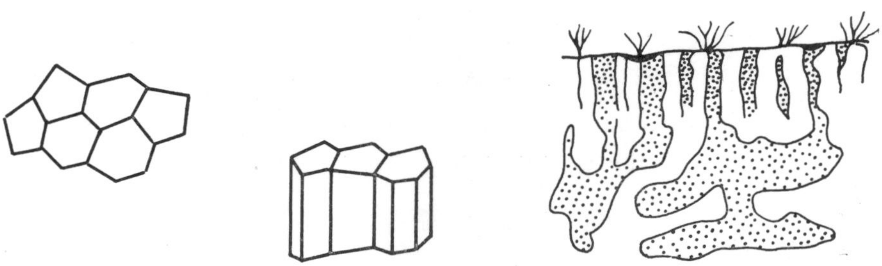
Castany (1954-1955) a observé à Zarzis et à Djerba deux croûtes calcaires encadrant le Tyrrhénien. La croûte supérieure serait alors Grimaldienne et l'inférieure Tensiftienne, mais la croûte calcaire Grimaldienne semble localisée aux abords immédiats du littoral.

B. — Ordre des paloésols gypsomorphes

Les encroûtements gypseux occupent de vastes surfaces en Tunisie méridionale ; principalement dans la zone des Chotts, la région de Gafsa, Metlaoui et la Djeffara. On peut distinguer deux familles d'encroûtement : l'encroûtement pavimenteux et l'encroûtement pulvérulent.

a) *Groupe à encroûtement pavimenteux* (Martins *in* Agafanoff 1936).

L'encroûtement pavimenteux est constitué d'un banc épais de gypse pulvérulent affleurant en surface. Ce banc est régulièrement divisé en prismes droits à bases pentagonales de 20-30 cm de diamètre formant une assise palissadique qui détermine en surface une polygonation régulière (cf. figure).



L'assise palissadique peut reposer sur divers types de substrats, sables, marnes, argiles, calcaires durs, etc.

L'encroûtement pavimenteux occupe de larges surfaces dans les régions de Gafsa, Metlaoui et sur les deux rives du Chott Fedjej.

Profil P 20. — Entre Gafsa et Metlaoui ; exposition sud-est ; pente 2,3 p. 100 ; coordonnées $34^{o}\,18'\,25''$ N $\times$ $8^{o}\,31'\,25''$ E ; glacis d'érosion au pied du Djebel Stah ; altitude 190 m.

Surface. — Bosselée avec un léger colluvionnement dans les creux du microrelief ; surface divisée en polygones réguliers à 5 côtés de 20 à 30 cm de diamètre donnant un aspect pavimenteux.

0-5. — Sable fin peu limoneux (dans les creux) ; structure particulaire lâche ; colmaté en glacis superficiel ; racines, radicelles ; HCl^+ ; couleur 7,5 YR 6/4 (brun-rougeâtre clair).

5-100. — Banc de gypse amorphe à macrostructure palissadique, constituée de prismes réguliers à bases pentagonales et arêtes

très nettes. Cimentation dure en surface et sur les faces du prisme, beaucoup plus friable à l'intérieur, microstructure feuilletée sur les surfaces du prisme surtout sur le polygone supérieur ; feuillets serrés de 1 à 2 mm se succèdent sur environ 1 cm d'épaisseur et donnant une coupe d'aspect rubanné ; quelques racines ; HCl = 0 ; couleur 5 YR 8/2 (blanc teinté de rose).

100-200. — Limon sableux à structure nuciforme et très nombreux pseudo-myceliums calcaro-gypseux très fins ; HCl^{++} ; quelques passages de cailloutis roulés à dominance calcaire et quelques grès siliceux de 1 à 10 cm de diamètre ; quelques racines ; sec ; couleur 7,5 YR 7/6 (jaune-rougeâtre).

200-240. — Limon contenant quelques graviers calcaires roulés dans la masse ; structure finement lamellaire serrée ; quelques traînées noirâtres ; racines ; pseudo-myceliums calcaro-gypseux très fins ; HCl^{++} ; sec ; 7,5 YR 7/4 (rose-beige).

240-350. — Limon sablo-argileux à très nombreux et fins pseudo-myceliums calcaro-gypseux ; structure nuciforme peu serrée tendant à polyédrique ; HCl^{++} ; pas de racines ; humide ; couleur 7,5 YR 6/6 (brun-jaune-rougeâtre).

Analyses (cf. tableau).

On notera la quasi absence de calcaire dans l'encroûtement gypseux. La teneur en gypse de l'assise palissadique peut atteintre 70 à 85 p. 100. L'encroûtement pavimenteux est d'âge antérieur à l'encroûtement pulvérulent ; il date probablement du Tensiftien. Son origine a été étudiée par R. Coque (1954-1955) qui a montré qu'il se formait à partir d'apports éoliens venus de la région des Chotts au cours des pulsations climatiques fini-pluviales. Cependant, *ce type d'encroûtement peut se former actuellement dans des conditions exceptionnelles.* Nous avons pu le constater aux environs de Moularès (au sud-ouest de Gara Douza).

Les rives d'un oued entaillées dans un sable gypseux à gypse pulvérulent présentaient un enrichissement superficiel en gypse. La couche de sable en contact avec l'air sur la falaise du bord de l'oued présentait une teneur de 25 p. 100 de gypse alors que les couches internes n'en contenaient que 17 p. 100. Or, cette falaise en bordure de l'oued est renouvelée périodiquement par éboulements. On doit en conclure qu'il peut y avoir de nos jours et localement, formation d'encroûtements gypseux par évaporation et en l'absence de nappes, à partir d'un matériau déjà riche en gypse et non encroûté.

On a expliqué la formation des polygones de l'assise palissadique (Kovda in CointePas, Novikoff et Roederer, 1959) par l'existence préalable de fentes de retrait dans le limon sous-jacent. Pour ingénieuse qu'elle soit, cette hypothèse ne peut manifestement pas convenir car

Profil n° 20.

Analyses physiques.

Profondeur	Granulométrie								Extrait de pâte saturée				Humidité équivalente %
	STG	SG	$S^1/_2G$	$S^1/_2F$	SF	STF	L	Coll. Min.	pour 1 000		Conductivité mmhos	% Saturation	
	2000 à 1000 µ	1000 à 500 µ	500 à 200 µ	200 à 100 µ	100 à 50 µ	50 à 20 µ	20 à 2 µ	— de 2 µ	Cl —	RS			
0-5	3	4	13	13	16	19	15	17	0,10	1,95	3,8	32,2	15,8
5-100	10	9	10	6	5	24	24	12	0,53	3,2	5,2	35,8	40,0
100-200	1	3	12	14	16	16	21	17	5,31	21,0	26,0	47,6	17,9
200-240	0	2	3	5	10	22	46	12	6,74	20,0	24,0	49,2	39,0
240-350	2	5	11	12	8	26	20	16	0,35	6,4	9,5	45,0	26,0

Analyses chimiques.

Profondeur	Milliéquivalents %				% terre sèche						
	Capacité d'échange			Na % de Tc	CO_3Ca total	CO_3Ca actif	Cl	SO_4	pH	SO_4Ca $2H_2O$	Cl Na
	T	Tcorr	Na								
0-5	10,4	11,4	2,3	20,1	22,1	3,5	0,02	4,9	7,3	8,8	0,03
5-100	4,8	5,3	3,0	56,1	4,7	26,5	0,03	23,3	7,8	42,0	0,05
100-200	18,5	20,3	13,0	64,0	28,1	9,0	0,31	7,9	8,0	14,2	0,50
200-240	16,4	18,0	5,8	32,2	33,6	12,0	0,37	6,7	8,1	12,0	0,60
240-350	11,7	12,9	3,6	26,9	27,4	15,0	0,03	11,9	7,9	21,4	0,05

ces assises palissadiques peuvent exister sur des substrats sableux ou rocheux où il ne saurait y avoir de fentes de retrait préalables. Pour notre part, nous pensons avec R. Coque (1955) qu'il s'agit simplement d'un phénomène analogue aux fentes de retrait des argiles. Le gypse pulvérulent n'est d'ailleurs pas sans présenter d'analogies avec les argiles à l'état sec : forte hygroscopicité, finesse des particules, forte humidité équivalente (30 à 40 p. 100). On notera que l'encroûtement palissadique se développe surtout en zone continentale où l'évaporation est beaucoup plus intense que dans la région littorale où l'atmosphère présente toujours une humidité relative assez élevée et où les encroûtements gypseux sont toujours du type pulvérulent.

b) *Groupe des encroûtements gypseux pulvérulents.*

Ces encroûtements se rencontrent principalement dans la Djeffara, les basses plaines orientales et le sahel méridional. Ils sont formés d'un horizon plus ou moins épais de gypse pulvérulent surmontant un horizon à gypse cristallisé posé sur des argiles ou limons gypsifères miocènes ou pliocènes.

Profil P 21. — Profil étudié aux environs de Gabès, exposition nord-ouest, pente 5 p. 100, dôme ; altitude 35 m ; coordonnées 37 gr. 62′ 10″ N × 8 gr. 64′ 15″ E.

0-5 I. — Surface en glacis colmaté ; pente 5 p. 100 ; sable fin gypseux à structure serrée ; racines, radicelles : nombreuses ; HCl^+ ; couleur 7,5 YR 7/4 (rose).

5-45 II. — Gypse pulvérulent à structure lâche avec quelques petits nodules calcaro-gypseux assez durs ; sec ; racines, radicelles ; $HCl \neq 0$; couleur 5 YR 8/2 (blanc-rosé).

45-100 III. — Limon gypseux à structure polyédrique avec de très nombreuses concrétions du gypse finement cristallisées dans toute la masse, quelques nodules calcaro-gypseux assez durs ; racines, radicelles ; couleur 5 YR 7/8 et 5 YR 8/2 (jaune-rougeâtre, blanc-rosé) ; HCl +.

100-117 IV. — Encroûtement calcaro-gypseux dur, formé de concrétions calcaro-gypseuses de 1-2 cm de diamètre soudées par du limon gypseux à gypse pulvérulent et cristallisé ; couleur 5 YR 8/3 (rose-blanchâtre) ; racines et radicelles rares ; HCl^{++}.

117-250. V. — Limon gypseux à structure polyédrique avec des nodules calcaro-gypseux durs et de petites roses des sables finement cristallisées ; HCl^+ ; couleur 5 YR 6/6 5, YR 8/2 (jaune-rougeâtre blanc-rosé).

Analyses.

Strates	I	II	III	IV	V
Humidité équivalente	10,6	29,0	25,6	26	26
$SO_4Ca\ 2H_2O$	5 %	60 %	15 %	10,4 %	6 %
Conductivité	0,6	2,8	2,7	3,0	3,1
ClNa %	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
CO_3Ca total %	12,2	1,3	2,2	55,7	3,5
pH	8,1	7,8	7,8	7,6	7,6



Encroûtement gypseux pulvérulent. cf : P. 21.

Ce profil montre nettement deux encroûtements distincts :

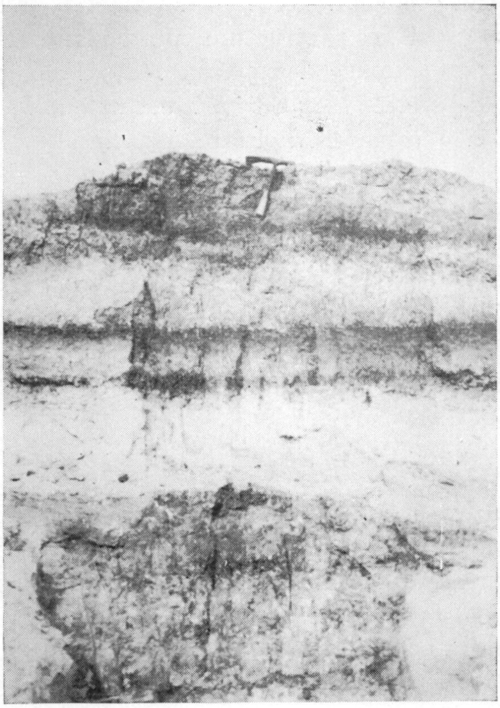
1° de 5 à 45 un encroûtement gypseux contenant 60 p. 100 de gypse et 1,3 p. 100 de calcaire ;

2° de 110 à 117 un encroûtement calcaire contenant 55,7 p. 100 de CO_3Ca et seulement 10 p. 100 de gypse.

L'encroûtement calcaro-gypseux est donc le plus ancien et peut être contemporain de la croûte saumon. L'encroûtement gypseux est très probablement d'âge Grimaldien-Soltanien.

Morphologiquement cet encroûtement diffère du précédent par sa structure plus lâche, pulvérulente et non gréseuse agglomérée, son absence de polygonation ; donc pas de prismes ici ni d'aspect pavimenteux en surface.

Edaphiquement c'est un milieu très sec ; humidité équivalente : 29 p. 100 ; on sait qu'en climat aride les sols créent des milieux d'autant plus xériques de leur humidité équivalente est plus élevée ; c'est-à-dire plus ils retiennent l'eau énergiquement, moins celle-ci est disponible pour les plantes. Les argiles et les gypses sont donc les milieux les plus secs.



Sol de « guelta », paleosol tourbeux saharien. cf : P. 22.

3432. — CLASSE DES PALÉOSOLS HYDROMORPHES

A. — Ordre des sols hydromorphes organiques.

a) *Groupe des paléosols tourbeux ou « sols de Gueltas »*.

Dans certaines vallées d'oueds sahariens qui ne sont plus guère fonctionnels on rencontre parfois des paléosols tourbeux témoins des anciennes périodes pluviales.

Voici un profil étudié entre Bordj-le-Bœuf et Remada dans la vallée de l'oued Guecira.

Profil P 22. — Situation : terrasse d'oued ; exposition ouest ; pente 0,5 p. 100 ; altitude 390 m ; coordonnées : 35 gr 81′ 00″ N × 8 gr 63′ 50″ E.

Surface : travertin constitué de débris végétaux accumulés

0-10. — où nous croyons reconnaître entre autres : des graminées, des prêles et des characées.

10-40. — Sable fin limoneux gris-noir avec des taches jaunes le long d'anciennes racines gypsifiées par de fins cristaux ; structure serrée ; HCl ≠ 0 ; coquilles d'*Helix* ; couleur au code 5 Y 4/1 > 10 YR 6/8 (gris-foncé, jaune-brunâtre).

40-70. — Sable fin gris cendreux avec des traînées jaunes le long des racines gypsifiées ; structure particulaire lâche ; coquilles d'*Helix* ; couleur au code 2,5 Y 6/2 > 2,5 Y 8/6 (gris-brun clair > jaune pâle) ; HCl = 0 ; cet horizon rappelle le A_2 des podzols.

70-90. — Horizon à sable fin noirâtre à racines gypsifiées ; traînées jaunes et brunes ; consistance cendreuse ; quelques coquilles d'*Helix* ; 5 Y 3/1 > 5 YR 4/6 (noir > rouge jaunâtre).

90-130. — Horizon cendreux gris-blanchâtre à racines gypsifiées ; quelques tâches jaune-rouille ; quelques coquilles d'*Helix* ; couleur 5 Y 7/3 (gris jaunâtre) ; HCl^{++}.

130-190. — Sable fin à structure particulaire à consistance cendreuses ; noirâtre ; quelques tâches jaune-rouille et traînées blanchâtres ; racines gypsifiées ; quelques *Helix* ; couleur 5 Y 4/1 (gris sombre) HCl = 0 ; industrie à lamelles de silex d'âge Ibero-maurusien (mésolithique).

190-250. — Horizon sableux gris-blanchâtre avec des traînées jaunâtres ; racines gypsifiées ; couleur 2,5 Y 6/2 (gris-jaunâtre clair) ; quelques *Helix* ; industrie à lamelles de silex Ibero-maurisienne.

250-270. — Horizon de sable fin noir ; racines gypsifiées ; *Helix* ; couleur 5 Y 2/1 (noir).

Analyses (cf. tableau).

Cette alternance d'horizons gris et noirâtre se poursuit sur environ 4 m ; ce qui fait environ 5 à 6 couches noirâtres. Cette alternance est probablement due aux pulsations climatiques de la fin du Grimaldien ; ainsi que semble l'attester l'industrie ibéro-maurusienne [1]. L'analyse pollinique des horizons tourbeux est en cours, ainsi que le dosage du radiocarbone. Des paléosols identiques existent dans les régions de Tatahouine et Djeneien.

[1] Ibero-maurusien I ou proto-ibero-maurusien de L. BALOUT (1956). Nous devons la détermination de cette industrie à l'éminent préhistorien de la Tunisie le Dr GOBERT.

Profil n° 22

Analyses physiques

Profondeur	Granulométrie								Extrait de pâte saturée			
	STG	SG	$S^1/_2G$	$S^1/_2F$	SF	STF	L	Coll. Min.	pour 1 000		conduc-tivité mmhos	% saturation
	2 000 à 1 000 µ	1 000 à 500 µ	500 à 200 µ	200 à 100 µ	100 à 50 µ	50 à 20 µ	20 à 2 µ	— de 2 µ	Cl —	RS		
10 — 40	1	2	1	31	47	9	4	5	2,84	13,0	17,0	30,8
40 — 70	0	0	0	22	68	4	2	4	3,72	16,0	20,0	29,6
70 — 90	0	1	1	24	52	7	8	7	7,95	24,5	30,0	29,8
90 — 130	1	1	1	37	48	3	3	6	2,30	11,0	14,8	28,8
130 — 190	0	0	0	22	64	5	3	6	3,19	13,0	17,0	29,4
190 — 250	0	1	0	40	53	1	1	4	3,37	13,0	17,0	28,8
250 — 270	0	1	1	23	52	8	6	9	0,10	2,15	3,6	31,2

Analyses chimiques

Profondeur	Milliéquivalents %				% terre sèche							% terre sèche	$\frac{C}{N}$	Couleur
	Capacité d'échange			Na % de Tc	CO_3Ca total	CO_3Ca actif	Cl	SO_4	pH	mat. orga.	C	N		
	T	Tcorr	Na											
10 — 40					11,3	2	0,08	0,9	8,8	1,04	0,60	0,028	21,4	Noir
40 — 70					2,2	0	0,10	0,5	8,6	0,51	0,27	0,019	14,2	Gris
70 — 90					4,8	0,5	0,22	1,0	8,6	0,51	0,30	0,030	10,0	Noir
90 — 130					8,7	5,0	0,07	0,5	8,4	0,15	0,0	0,014	—	Gris
130 — 190					3,9	2,0	0,09	0,6	8,5	—	0,09	0,019	4,7	Noir
190 — 250					1,7	1,0	0,09	0,4	8,3	0,18	0,0	0,014	—	Gris
250 — 270					4,3	2,0	0,005	0,8	8,4	1,2	0,72	0,047	15,3	Noir

CONCLUSIONS

Dans le domaine de l'application chaque catégorie de sols pose des problèmes particuliers de mise en valeur. On peut, cependant, affirmer que le facteur essentiel à considérer pour la mise en valeur des sols du Sud tunisien est leur bilan d'eau. Les sols les plus favorables étant ceux qui sont susceptibles d'accumuler l'eau en profondeur et de la restituer aux cultures par la suite ; ce qui postule une bonne perméabilité de surface, une faible capacité pour l'eau, une grande profondeur, l'absence de toxicité et une position topographique favorable. Ce point de vue est largement confirmé par l'étude de la végétation spontanée et celle de la productivité des cultures. Ce n'est d'ailleurs que l'expression de la « loi du minimum » de Liebig.

Ce bref aperçu des sols de la Tunisie méridionale n'a nulle prétention d'être exhaustif ; il existe des nombreuses combinaisons possibles entre les catégories examinées. On a le plus souvent affaire à des sols complexes, soit décapés par l'érosion, soit, au contraire, alluvionnés ou colluvionnés. Les faits les plus remarquables sont : l'extension des croûtes quaternaires, calcaires ou gypseuses, et des sols salés ; l'évolution des alluvions et des colluvions récentes vers un sol brun subdésertique caractérisé par sa très faible teneur en matières organiques et par la présence en profondeur d'un horizon à nodules.

Nous avons signalé quelques unités systématiques de sols non encore décrits, à notre connaissance, tels les sols à encroûtement de nappe à intumescences gypseuses, les carapaces gypseuses de transport et les regs pulvérulents à Fech-Fech.

SUMMARY

Contribution to the study of soils in southern Tunisia.

While every kind of soil has its particular problem in respect of its utilization, the essential factor in the utilization of soils in southern Tunisia is their water balance. The most suitable soils are those which store water to great depths and subsequently makes it available to the crops ; this requires a good permeability of the top soil, a low field capacity, great depth, absence of toxic factors, and favourable topography. This is actually an expression of Liebig's « law of minimum » and is confirmed by the study of the spontaneous vegetation and the yields of crops.

This short review of soils in southern Tunisia is far from complete, and many combinations between the categories investigated are possible. In the majority of cases, there are present complex soils either affected by erosion or formed by alluvial or colluvial processes. The most notable features are : the extensive presence of calcareous or gypseous crusts and of saline soils, and the evolution of recent alluvia and colluvia into semi-desertic brown soils characterized by very low levels of organic matter and by the presence of a deep horizon containing concretions.

Some systematic units of so far undescribed soils are given, such as soils with, crusts showing gypseous intumescences at the groundwater level, gypseous transport pans, and the pulverulent « regs of Fech-Fech ».

Дополнение к изучению почв тунизийского юга.

ЛЕ-ХУЭРУ (Ботанический Институт, Монпелье).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В области применения, каждая категория почв ставит лично ей свойстенные задачи освоения. Тем не менее, можно утверждать, что главным фактором что нужно иметь в виду является водный билан. Наиболее пригодными почвами являются те, что могут накоплять воду в глубине и ее затем отдавать культурам; это требует хорошую проницаемость верхнего слоя, слабое водоудержание, большую глубину, отсутствие вредных веществ и удачное топографическое положение. Эта точка зрения широко подтверждается изучением дикой растительности, равно как и производительностью культур. Что, впрочем, есть лишь подтверждение «закона минимума» Либиха.

Этот краткий обзор почв южной Тунизии не претендует на абсолютную точность; между описанными категориями существует много возможных комбинаций. Чаще всего приходится иметь дело с почвами комплексными : или эродированными, или, напротив, аллювионами и коллювионами. Наиболее замечательны следующие факты : распространение четвертичных корок, известковых или гипсовых, и засоленных почв; эволюция молодых аллювиальных и коллювиальных почв к коричневой полупустынной, характеризующейся своим слабым содержанием органических веществ и присутствием в глубине горизонта с «nodules» (= конкрециями).

Мы описали несколько систематических единиц (= типов) почв, до сих пор не описанных, поскольку нам известно, а именно : почвы с коркообразованием обусловленным водяным уровнем, с гипсовыми вспуханиями; гипсовые корки транспорта и пылевые «reg» в Феш-Феш.

ZUSAMMENFASSUNG

Beitrag zum Studium der südtunesischen Böden.

Jede Bodenkategorie stellt, in ihrem Anwendungsbereich, besondere Nützungsprobleme. Es kann jedoch behauptet werden dass die Wasserbilanz der südtunesischen Böden der wichtigste Faktor ihrer Erschliessung darstellt. Die günstigsten Böden sind diejenigen welche geeignet sind, in ihrer Tiefe Wasser aufzuspeichern und dasselbe später den Kulturen zugute kommen zu lassen ; dies setzt eine gute Oberflächenpermeabilität, eine schwache Wasserka-

pazität, eine grosse Tiefgründigkeit, die Abwesenheit von Toxizität sowie eine günstige topographische Lage voraus. Dieser Standpunkt wird weitgehendst durch das Studium der « spontanen Vegetation » sowie durch die Produktivität der Kulturen bestätigt. Dies ist übrigens nur eine Ausdrucksweise des Liebig'schen « Gesetz vom Minimum ».

Diese kurze Ubersicht über südtunesischen Böden erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit ; es bestehen zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten zwischen den untersuchten Kategorien. Es handelt sich meistens um Bodenkomplexe welche entweder durch Erosion abgetragen oder im Gegenteil angeschwemmt oder kolluvionniert wurden. Die markantesten Tatsachen sind : die Ausdehnung der quartären Kalk-oder Gipskrusten sowie der Salzböden ; die Entwicklung des rezenten Schwemm — und Kolluvialmaterials zu einem braunem Wüstensteppenboden welcher sich durch einen geringen Gehalt an organischer Materie sowie durch die Anwesenheit eines « Knotenhorizontes » in der Tiefe kennzeichnet.

Wir haben auf einige systematische Bodeneinheiten aufmerksam gemacht, welche, unserer Kenntnis nach noch nicht beschrieben wurden, so die Böden mit Grundwasserspiegelverkrustungen durch Gipsanschwellungen, die Transportgipskrusten sowie die pulverartigen Fech-Fech Regs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGAFONOFF (V.). — Sols types de Tunisie. 413 p. 65 pl., 2 cartes. *Ann. Serv. Bot. Agron.*, Tunisie, XII-XIII, 1936.

AUBERT (G.). — Les sols de la France d'Outre-Mer. 1 vol., Imp. Nat. Paris, 1941.

AUBERT (G.). — Les sols des régions arides d'Afrique et leur mise en valeur in « Les bases écologiques de la régénération de la végétation des zones arides », pp. 11-25, UNESCO, Paris, 1951.

AUBERT (G.). — Les sols d'Afrique du Nord. (Conférences faites aux pédologues du Maroc), 26 p. ronéot., 1956.

AUBERT (G.). — Classification des sols pour la carte d'Afrique au 1/2.000.000^{e} in « Analyse des livres et brochures à l'intention de l'ORSTOM, 1958.

AUBERT (G.). — Cours de pédologie générale professé à l'ORSTOM (inédit), 1958.

AUBERT (G.) et DUCHAUFOUR (Ph.). — Projet de classification des sols. VI^{e} congrès Intern. Sc. du sol., 1956.

BERKALOFF (E.) et TIXERONT (J.). — Notice de la carte de ruissellement annuel moyen en Tunisie. 11 p., 1 carte au 1/1.000.000^{e}. Études d'hydraul. et d'hydrol. série 1, fasc. 7, Minist. trav. Publ. Tunis., 1958.

BERKALOFF (E.), FINIELZ (H.) et TIXERONT (J.). — L'utilisation des eaux salées en Tunisie. 20 p. Dir. Trav. Public, Tunis, 1953.

BÉTRÉMIEUX (R.). — Étude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. Agronom.*, p. 193-295, 1951.

BOULAINE (J.). — Étude des sols de la plaine du Chelif (Thèse), 582 p., Fac. des Sciences, Alger, 1957.

BOURALY (J.). — Étude générale des sols de la plaine de Kairouan, 28 p. ronéot., 2 cartes, 7 tabl., sect. spéc. et péd. et hydrol., Tunis, 1956.

BOURRIER (J.). — Mesure des caractères hydrodynamiques des sols à la station expérimentale d'hydraulique agricole de Vergières, 12 p. ronéot. (inédit), 1954.

BRYSSINE (G.). — Contribution à l'étude des propriétés physiques des sols. *Bull. Soc. Sc. Nat. et phys. du Maroc*, **6-7**, 1953 et **8-9**, 1954.

BRYSSINE (G.). — Typologie des sols du Maroc. *Bull. Soc. Sc. Nat. et Phys. du Maroc*, 1954.

COQUE (R.). — Les croûtes gypseuses du sud tunisien. *Bull. Soc. Sc. Nat. Tunisie*, VII, fasc. 3-4, pp. 217-235, 1955.

COQUE (R.). — Morphologie et croûte dans le sud tunisien. *Ann. de géogr.*, **345**, pp. 359-370, 1955.

COQUE (R.). — Morphologie de la Tunisie présaharienne. *Trav. Inst. Rech. Sah.*, XVII, pp. 59-82, 1958.

DEMOLON (A.). — La dynamique du sol, 520 p., Dunod Paris, 1952.

DEMOLON (A.) et LEROUX (D.). — Guide pour l'étude expérimentale du sol, 251 p. Gauthiers-Villars, Paris, 1952.

DESAUNETTES (J. R.) et VIGNERON (J.). — Étude pédologique au 1/50.000 de la costière du Gard et de la Vistrenque. *Ann. Agronom.* série A, VI, pp. 749-787, 1958.

DESAUNETTES (J.). — Méthodes analytiques du laboratoire de pédologie de Tunis. *Dir. trav. publics*, Tunis, 76 p., 1955.

DESSUS (P.). — Sur l'utilisation des eaux salées dans les territoires du sud, 16 p. ronéot., *sect. spéc. Hydrol. et pédol.*, Tunis, 1950.

DESSUS (P.). — Étude pédologique du périmètre d'Arram. Rapport ronéot., *sect. spéc. pédol. et hydrol.*, Tunis, 1950.

DESSUS (P.) et NANI (R.). — Étude du périmètre des Adharas. 16 p., ronéot., *ibid*, 1948.

DESSUS (P.) et GELPE (J.). — Note préliminaire concernant le périmètre irrigable de Klebia, 9 p. ronéot. *ibid.*, 1952.

DESSUS (P.) et GELPE (J.). — Note concernant l'association d'intérêt collectif de Zigzaou. 21 p. ronéot. *ibid*, 1954.

DOMERGUE (Ch.), DUMON (E.), de LAPPARENT (A. F.) LOSSEL (P.). — Géologie du sud et de l'extrême sud tunisiens. XIX^e congr. intern. Géol. 2^e série, n^o 7, 38 p., Alger, 1952.

DURAND (J. H.). — Étude géologique, Hydrologique et pédologique des croûtes en Algérie (Thèse), 210 p., serv. de l'hydraulique, Alger, 1953.

DURAND (J. H.). — Les sols d'Algérie, 244 p., Serv. de l'hydraulique, Alger, 1954.

DURAND (J. H.). — Les croûtes calcaires S. L. d'Afrique du Nord étudiées à la lumière de la biorhéxistasie. *Trav. Sect. pédol. et agrologie*, bull. n^o 2, Alger, 1956.

DURAND (J. H.). — Les sols irrigables. 190, p. Serv. Hydraul. Alger, 1958.

DURAND (J. H.). — Les sols rouges et les croûtes en Algérie., 188 p. *ibid.*, 1959.

DUCHAUFOUR (Ph.). — Pédologie, applications forestières et agricoles, 310, p. Ec. Nat. Eeaux et Forêts, Nancy, 1956.

EMBERGER (L.). — La définition phytogéographique du climat désertique. *C. R. Soc. Biogéogr.* (Vol. sur les régions désertiques, p. 1-14), 1937.

EMBERGER (L.). — Une classification biogéographique des climats. Naturalia Monspeliensia. *Rec. Trav. Inst. Bot.* Montpellier, fasc. 7, p. 3-43, 1955.

ERHART (H.). — La genèse des sols en tant que phénomène géologique, 90 p., Masson, Paris, 1956.

FOURNET (A.). — Reconnaissance des sols du périmètre de Gafsa-Lalla, 29 p. ronéot., *sect. spéc. de pédol. et Hydrol.*, Tunis, 1958.

HALLAIRE (M.). — Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. *Ann. Agronom.*, n^o 2, 1952.

HUGUET del VILLAR (E.). — Types des sols de l'Afrique du Nord. fas. 1 et 2, 288 p. Rabat, (1947).

HUGUET del VILLAR (E.). — Méthode de classification et analyse des sols. 193 p. *Trav. Inst. Scient. Chérif.*, Rabat, 1953.

KUBIENA (W. H.). — The soils of Europe, 317 p. Londres, 1953.

LE HOUÉROU (H.-N.). — Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale (Thèse). 570 p. Ronéot., Fac des Sciences, Montpellier, 1959. *Inst. Rech, Sahariennes,* Alger (sous Presse).

LE HOUÉROU (H.-N.). — Contribution à l'étude de la végétation de la région de Gabès. *Annales Serv. Bot.Agron. de Tunisie,* 28, p. 141-180, 1956.

LE HOUÉROU (H. N.). — Écologie, Phytosociologie et Productivité de l'olivier en Tunisie méridionale. *Bull. Serv. carte phytogéogr.* ; série B, IV, 1, p. 7-72 ; C. N. R. S. Paris 1959.

LE HOUÉROU (H.-N.). — Carte des milieux édaphiques de la Tunisie, zones aride et désertique ; échelle 1/500.000^{e}. Inédit. *Archives Institut Botanique, Montpellier.*

LE HOUÉROU (H.-N.). — Carte des groupements végétaux de la Tunisie au 1/500.000^{e}, zones aride et saharienne, à paraître dans : *Ann. du Serv. Bot. et Agron. de Tunisie.*

LOBOVA (H.). — Géographie des sols de la zone désertique de l'U. R. S. S. — Rapp. VI^{e} Congr. Intern. de la Science du sol. Vol. E, p. 213-219, 1956.

IVANOVA (E. N.). — Essai de classification générale des sols. Rapp. VI^{e} Congr. Intern. Sc. du Sol. Vol. E. p. 387-399, 1956.

LONG (G.). — Contribution à l'étude de la végétation de la Tunisie centrale. *Ann. Serv. Bot. et Agron. Tunisie,* vol. 27, p. 1-388, 1954.

NOVIKOFF (G.). — Relations entre la structure de la végétation et la stratification des milieux halophiles en Tunisie. *Bull. Serv.* carte phytogéogr., série B, T III, fasc. 1, pp. 69-83, 1958.

NOVIKOFF (G.), COINTEPAS et ROEDERER (P.). — Note explicative de la tournée UNESCO sur la salinité. 50 p. ronéot., s. sp. *Ped. Hydrol.,* Tunis, 1959.

PLAISANCE (G.). — Formations végétales et paysages ruraux, 418 p, Gauthier-Villars, Paris, 1959.

PLAISANCE (G.) et CAILLEUX (A.). — Dictionnaire des sols. 604 p., la Maison rustique, Paris, 1958.

SABATHÉ (R.). — Étude pédologique du périmètre du Bled Segdal-Hichria, 11 p. ronéot., sect. sp. et pédol. et hydrol, Tunis, 1958.

TRICART (J.) et CAILLEUX (A.). — Cours de géomorphologie, 6 fasc., 1400 p. ronéot., CDU, Paris, 1958.

TURC (L.). — Le bilan de l'eau des sols : Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agron.* n^{o} 1, p. 5-131, 1955.

VERNET (A.) et GAUSSEN (H.). — Carte des précipitations de la Tunisie au 1/500.000^{e}, 1952.

VERNET (A.). — Notice de la carte des précipitations de la Tunisie, 20 p., Dir. Trav. Publ., Tunis.

631.416.322 : 631.461,71 :631.811.94 :546.22.

LES COMPOSÉS DU SOUFRE DU SOL ET LEUR ÉVOLUTION, RAPPORTS AVEC LA MICROFLORE, UTILISATION PAR LES PLANTES.

PAR

G. SIMON-SYLVESTRE

Station centrale d'Agronomie, Versailles.

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

I. — Les composés du soufre dans le sol.

1. — Teneur des sols en soufre.
2. — Nature des composés du soufre dans le sol.
3. — Origine des composés soufrés du sol.

II. — Évolution biologique des composés du soufre du sol et rapport avec la microflore.

1. — Le cycle du soufre.
2. — Minéralisation du soufre organique.
3. — Oxydation du soufre minéral.
 a) Oxydation de l'hydrogène sulfuré.
 b) Oxydation du soufre et des dérivés soufrés minéraux : thiosulfates, thionates.
4. — Réduction du soufre minéral.
 a) Organismes responsables de cette réduction.
 b) Conséquences des activités des Sulfato-réducteurs.

III. — Alimentation des plantes en soufre.

1. — Sources de soufre pour la plante.
2. — Absorption du soufre et interactions avec les autres éléments.

Résumé.

Références bibliographiques.

La croissance des plantes exige des quantités importantes de soufre, élément « physiologiquement nécessaire » aux végétaux, ainsi que le disait DEMOLON. En effet, ses fonctions sont nombreuses. C'est un des constituants de la cellule végétale ; il entre dans la composition de la molécule de plusieurs acides aminés soufrés : cystéine, cystine, méthionine, présents dans la plupart des protéines végétales.

A ce rôle plastique s'ajoute un rôle catalytique, tout aussi important ; en particulier, le soufre intervient comme catalyseur dans la synthèse de la chlorophylle, ce qui explique la coloration vert pâle des plantes carencées en cet élément. Il est également présent dans deux vitamines : biotine et thiamine. L'activité de certaines diastases (réductase, saccharase) de la pomme de terre et de la betterave dépend aussi de la teneur de ces plantes en soufre. De plus, sa présence stimule la fixation d'azote chez les légumineuses. Enfin, vis-à-vis de certains microorganismes du sol, il joue un rôle important puisqu'il peut servir de donateur ou d'accepteur d'hydrogène.

Nous nous proposons d'étudier dans ce mémoire les composés du soufre dans le sol, leur nature, leurs origines, leur évolution biologique ainsi que leur absorption par les plantes.

I — LES COMPOSÉS DU SOUFRE DANS LE SOL

1. — Teneur des sols en soufre.

Ce n'est que depuis peu qu'on s'est préoccupé du soufre dans les terres. Il est vrai que les méthodes pour le dosage de cet élément dans le sol ont été longtemps imparfaites et les renseignements obtenus étaient souvent erronés ; de plus, les apports de soufre n'apparaissaient pas nécessaires puisqu'inconsciemment les agriculteurs utilisent des engrais en contenant des quantités importantes (superphosphate, sulfate d'ammonium, sulfate de potassium) ainsi que des fongicides soufrés : soufre, sulfate de cuivre, bouillie sulfocalcique. C'est Gabriel BERTRAND (1927) qui mit finalement au point une méthode correcte de dosage du soufre total dans le sol et dissipa ainsi l'ancien préjugé des agriculteurs à savoir que toutes les terres étaient suffisamment pourvues en soufre. Cette méthode comprend une oxydation partielle de la terre au bain-marie électrique en présence d'acide nitrique fumant (afin de fixer le soufre volatil) suivie d'une fusion en présence de nitrates et de carbonates alcalins ; la totalité du soufre est alors transformée en sulfates alcalins, lesquels sont ensuite précipités par le chlorure de baryum.

Les quantités de soufre contenues dans les terres cultivées oscillent entre d'assez larges limites et s'abaissent parfois à des valeurs très faibles. GOLDSCHMIT (1951) signale des teneurs en soufre total variant entre 40 et 1800 kg par hectare, teneurs d'ailleurs plus faibles dans les sols sableux

granitiques que dans les limons lourds, riches en matière organique. D'après GOUJON, au laboratoire du Mans (chiffres donnés par PERRIER 1952), sur 50 terres examinées, 4 seulement renferment plus de 1 p. 1000 de soufre total, 32 contiennent de 0,5 à 1 p. 1000 et 22 moins de 0,5 p. 1000. Les sols sont donc en général pauvres en soufre et ce n'est qu'exceptionnellement que leur richesse naturelle suffit à l'alimentation des plantes. Il est intéressant de rappeler à ce sujet que BERTRAND (1927) avait remarqué une certaine concordance entre la richesse des terres en soufre et leur fertilité.

2. — Nature des composés du soufre dans le sol.

Le soufre est présent dans le sol sous les deux formes : minérale et organique.

1° Forme minérale.

Dans un sol normal, c'est-à-dire bien aéré, le soufre minéral comprend presqu'uniquement des *sulfates*. En anaérobiose, par contre, les *sulfures* constituent la forme typique minérale : des pyrites de fer et des composés analogues peuvent parfois apparaître dans quelques sols, mais si l'aération est suffisante ils sont aussitôt transformés en sulfates.

Les sulfates d'un sol, provenant soit d'apports, soit de l'oxydation biologique des sulfures, ne sont pas tous assimilables par les plantes. Outre une partie importante entraînée par les eaux du drainage, une quantité parfois non négligeable — puisque certaines terres d'après BERTRAND (chiffres donnés par PERRIER 1952) contiennent jusqu'à 1,7 p. 1000 de baryum — est insolubilisée à l'état de sulfate de baryum et est ainsi soustraite à l'alimentation des plantes. De plus, dans des sols argilo-ferrugineux, les sulfates donnent des combinaisons ferriques ou aluminiques peu solubles, lesquelles s'éliminent lentement dans les eaux de drainage (DEMOLON et BASTISSE, 1941). Enfin, les sulfates forment des combinaisons d'adsorption avec les colloïdes du sol (BARBIER et CHABANNES, 1944). Les terres cultivées renferment en moyenne 50 kg de soufre à l'hectare dans cet état. Les sulfates, dans ce cas, possèdent des propriétés intermédiaires entre celles des anions fortement retenus comme les phosphates et celle des anions non fixés tel le chlore. A ce sujet, ENSMINGER (1954) signale la teneur faible de la surface du sol en sulfates lors d'apport de grosses quantités de phosphates : ceux-ci ont alors remplacé les sulfates ainsi que l'a d'ailleurs vérifié à nouveau KAMPRATH (1956).

Tous les sulfates ne sont donc pas utilisables par les plantes et c'est principalement dans les couches superficielles des sols que les teneurs sont les plus faibles, ainsi que le témoignent les résultats donnés par la méthode CHESNIN (1950) basée sur l'extraction de ces sulfates par le

réactif MORGAN : acide acétique + acétate de sodium. Il faut atteindre au moins 50 cm de profondeur pour trouver les plus fortes doses de sulfate assimilable (JORDAN et BARDSLEY, 1958). Cela permet d'expliquer le fait que parfois des plantes accusent des symptômes de carence en soufre lors de leur début de croissance, symptômes disparaissant ultérieurement lors de la pénétration en profondeur de leurs racines.

A côté des sulfates, qui sont les composés minéraux soufrés du sol de beaucoup les plus importants, peuvent également être décelés des produits intermédiaires solubles formés au cours de l'évolution du soufre dans la terre arable (KEILING et GUITTONNEAU, 1932). Incomplètement oxydés, ils appartiennent aux groupes des *hyposulfites et des polythionates* supérieurs. Du *soufre élémentaire* y est quelquefois mis en évidence. Ils ne s'accumulent pas dans le sol et, après un temps variable, disparaissent en donnant des sulfates.

2° Forme organique.

La plus grande partie du soufre du sol existe sous la forme organique ; des transformations microbiennes le rendent alors utilisable par les plantes. Mis à part quelques sols semi-arides où, à la suite d'un drainage insuffisant, de grosses quantités de sulfates de sodium, de potassium et de magnésium sont présentes, la matière organique, de même qu'elle est le réservoir de bien d'autres éléments nutritifs, apparaît dans la majorité des sols comme la principale source de soufre. Les chiffres donnés par STARKEY (1950) sont à ce sujet très éloquents ; ainsi pour des régions humides :

dans un sol forestier qui contient 0,58 p. 1000 de S total, 10 p. 100 seulement du S sont à l'état de sulfate ;

dans un sol labourable qui contient 0,42 p. 1000 de S total 14 p. 100 seulement du S sont à l'état de sulfate ;

dans un sol compost qui contient 1,26 p. 1000 de S total, 21 p. 100 seulement du S sont à l'état de sulfate.

De leur côté, BERTRAND et SILBERSTEIN (1927) avaient trouvé dans une terre de jardin, très riche en soufre (5,2 p. 1000) et en matières organiques, 21 p. 100 du soufre à l'état de sulfate. D'après EVANS et ROST (1945), le soufre organique des prairies et des tchernozems représente plus de 60 p. 100 du soufre total. Cette forte proportion du soufre organique s'explique facilement par suite de l'importante solubilité des sulfates qui sont rapidement entraînés par les eaux de pluie.

Les quantités de ce soufre organique rendues assimilables aux plantes, dépendent de plusieurs facteurs, notamment de la nature des substances organiques du sol, de leur concentration, de la présence de microorganismes appropriés et de l'existence de conditions de température et d'hu-

midité favorables au développement de ceux-ci (CONRAD, 1950). Ce soufre, d'après des analyses faites sur des terres du Minnesota (EVANS et ROST, 1945) est important en surface. Par contre, son taux diminue avec la profondeur en même temps que décroît la matière organique. Il est d'ailleurs lié à la matière organique : ces mêmes auteurs ont pu établir pour des tchernozems les rapports C/S organique total et N/S organique total. Ils ont également séparé du soufre organique total le « soufre de l'humus » lequel dans les sols de prairies et de tchernozems serait à peu près constant et représenterait environ 10 à 15 p. 100 du soufre total. Ce soufre de l'humus appartiendrait à la fraction de la matière organique prête à se minéraliser. Les rapports qui existent d'une part entre le soufre de l'humus et le carbone et l'azote du sol et d'autre part entre le soufre organique total et ces mêmes carbone et azote, peuvent être utilisés pour déceler les carences en soufre des sols, en particulier dans les tchernozems et les sols de prairies où les corrélations sont plus nettes que dans les sols podzoliques.

3. — Origines des composés soufrés du sol.

1° Le sol.

La croûte terrestre renferme environ 0,11 p. 100 de soufre et les roches mères constituent la source initiale du soufre. Elles fournissent des sulfures métalliques lesquels, dans des sols normaux bien aérés, se transforment rapidement en sulfates.

A ce soufre minéral, s'ajoute du soufre organique provenant de déchets animaux et végétaux et mis en réserve dans la matière organique des sols. Peu à peu, par voie microbienne, ce soufre est transformé en sulfates et devient alors assimilable par les végétaux. C'est une moyenne de 10 kg de soufre qui sont minéralisés par hectare et par an.

2° L'atmosphère.

Les eaux de pluie sont les principaux pourvoyeurs de l'anhydride sulfureux de l'atmosphère et le phénomène est surtout marqué dans les villes, près des foyers de combustion. Alors qu'à Versailles, pour une moyenne de 10 années, DEMOLON et BASTISSE (1941) n'ont trouvé qu'un apport de 10 kg de soufre par hectare et par an, les chiffres atteignent 15 kg à Grignon et même une centaine de kg aux Etats-Unis, près des villes industrielles où l'atmosphère est surchargée en SO_2. On compte généralement sur un apport moyen de 10 kg par hectare et par an. Ces apports, d'ailleurs maxima pour des faibles précipitations survenant après une période sèche, s'abaissent après des pluies persistantes.

3° Les engrais.

Ils constituent la principale source du soufre du sol, Au gypse employé autrefois, s'ajoutent les engrais sulfatés courants : le superphosphate avec 11,6 p. 100 de S, le sulfate d'ammonium 24 p. 100 de S et le sulfate de potassium 18 p. 100 de S. Le fumier de ferme (0,5 p. 1000 de S), les goémons, les engrais organiques renferment également du soufre Il faut aussi citer l'acide sulfurique encore parfois utilisé comme désherbant, le soufre employé comme fongicide, ainsi que le sulfate de cuivre. Les quantités de soufre ainsi apportées au sol sont faibles comparativement à celle provenant des engrais proprement dits. Pour une fumure moyenne de :

40 kg d'azote/ha (ammonitrate)
70 kg de P_2O_5/ha (superphosphate)
60 kg de K_2O/ha (chlorure)

45 kg de soufre/ha sont fournis au sol. Cinq kg de soufre supplémentaires sont à ajouter à ces 45 kg si la terre reçoit en plus un apport annuel de 10 tonnes de fumier à l'hectare.

II. — ÉVOLUTION BIOLOGIQUE DES COMPOSES DU SOUFRE DU SOL ET RAPPORT AVEC LA MICROFLORE

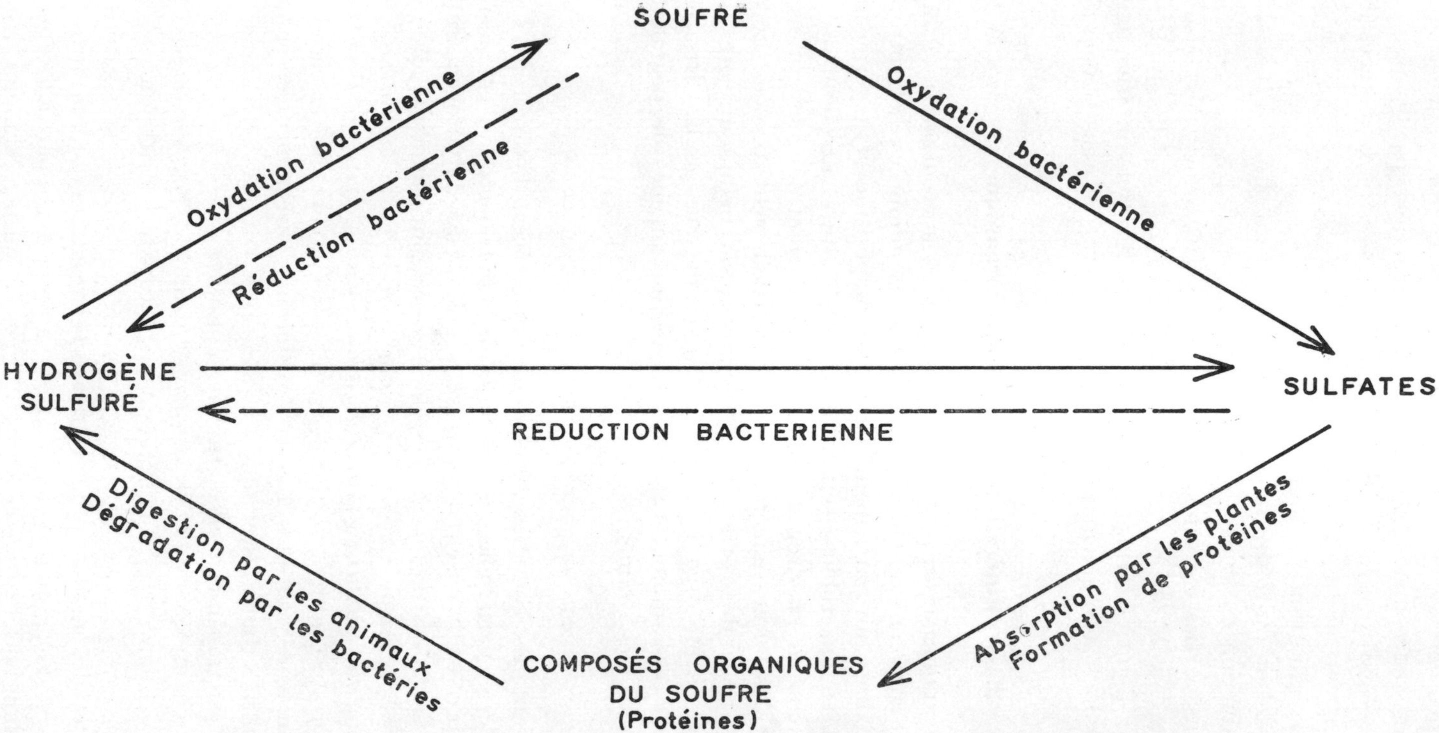
1. — Le cycle du soufre.

Dans la nature, le soufre et ses composés subissent de nombreuses transformations où interviennent à côté d'agents purement chimiques des agents biologiques : animaux, végétaux supérieurs et microorganismes. C'est l'étude de ces derniers qui sera faite dans cette seconde partie : leur action importante s'exerce principalement dans le sol, quelquefois dans les eaux.

Animaux et bactéries digèrent les plantes et convertissent, les secondes surtout, leurs composés organiques soufrés en hydrogène sulfuré qui est ensuite transformé en soufre et sulfates par d'autres bactéries du sol. Les sulfates ainsi produits sont utilisés par les plantes et employés dans la synthèse des protéines végétales et le cycle recommence.

Outre ce cycle principal, il y a deux cycles subsidiaires : l'un comprenant une réduction directe des sulfates en sulfures sans l'intermédiaire des composés organiques, et l'autre une réduction directe du soufre en sulfures.

Le cycle du soufre présente beaucoup d'analogies avec le cycle de l'azote. Aux nitrates correspondent les sulfates utilisés par les végétaux. De même, le dégagement de l'hydrogène sulfuré dans la décomposition des protéines soufrées est analogue à celui de l'ammoniac au cours de



CYCLE du SOUFRE

(BUNKER — 1939)

l'ammonification. Ce cycle est cependant plus complexe que celui de l'azote, les stades moins bien définis et les réactions parfois plus obscures. Trois parties principales peuvent toutefois être distinguées dans ces transformations biologiques :

la minéralisation du soufre organique,
l'oxydation du soufre minéral,
la réduction du soufre minéral.

A ces trois parties correspondent les trois formes principales du soufre retrouvées dans le sol : le soufre organique, les sulfates et les sulfures. Il existe bien d'autres formes qui proviennent de réactions intermédiaires, mais elles ne s'accumulent pas dans le sol, ainsi que nous l'avons déjà signalé.

2. — Minéralisation du soufre organique.

La dégradation du soufre organique par les microorganismes du sol est encore mal connue. On sait que ce sont de nombreux hétérotrophes non spécialisés qui participent à cette décomposition et le terme final dominant en anaérobiose serait l'hydrogène sulfuré. En aérobiose par contre, à côté de l'hydrogène sulfuré, se rencontrent des mercaptans, du soufre, et des formes minérales soufrées partiellement oxydées. Le rapprochement peut donc être fait entre la minéralisation du soufre organique et celle de l'azote organique ; il y a en somme une « sulfhydrisation » comparable à l'ammonification, mais les mécanismes de dégradation y sont moins bien connus.

Agents responsables de cette minéralisation.

Ce sont des bactéries aérobies ou anaérobies, hétérotrophes non spécialisées et parmi elles, les bactéries de la putréfaction. C'est ainsi que Tarr (1933) a obtenu en anaérobiose la production d'hydrogène sulfuré à partir de la cystine, de la cystéine, ou du glutathion par différents organismes : *Proteus vulgaris, Serratia marcescens, Pseudomonas aeruginosa, Bacillus subtilis, Clostridium spirogenes.*

D'après Starkey (1953), il existe, pour la cystine, en aérobiose, deux groupes de bactéries, l'un la transformant directement en sulfates, l'autre en polythionates et soufre élémentaire. Pour la méthionine, tout le soufre est transformé en méthylmercaptan.

Des champignons, *Microsporum gypseum, Aspergillus niger,* ainsi que des actinomycètes seraient également capables d'attaquer les protéines soufrées.

Des études au champ ont confirmé ces résultats obtenus au laboratoire. C'est ainsi que Starkey (1950) a observé l'apparition rapide de sulfates dans un sol après une addition de cystine ou de méthionine. Barjac

et Pochon (1952) de leur côté, ont trouvé en anaérobiose une prédominance de l'hydrogène sulfuré, tandis qu'en aérobiose apparaissaient des mercaptans, des sulfites et des sulfates. Les terreaux, les terres de jardin, les terres de grande culture renferment à ce sujet une microflore plus active que les sols pauvres (terres rouges de l'Esterel, terres sableuses, terres de bruyères acides).

La dégradation du soufre organique apparaît donc être l'œuvre de nombreux microorganismes dont les produits de métabolisme diffèrent suivant la nature des réactions : en anaérobiose, l'hydrogène sulfuré reste le terme majeur ; en aérobiose, des mercaptans, et des dérivés minéraux plus ou moins oxydés viennent s'y ajouter.

3. — Oxydation du soufre minéral.

Le soufre organique minéralisé est repris immédiatement par d'autres bactéries, généralement des autotrophes spécifiques qui le transforment en sulfates assimilables par les plantes. Ces transformations sont mieux connues que les précédentes : ce sont des réactions d'oxydation dans lesquelles le soufre joue le rôle de donateur d'hydrogène.

Deux divisions peuvent être faites dans cette partie suivant que l'oxydation porte sur l'hydrogène sulfuré uniquement, ou bien sur le soufre et les formes minérales du soufre déjà partiellement oxydées.

a) **Oxydation de l'hydrogène sulfuré.**

Cette partie sera traitée assez brièvement, car il semble que dans le sol cette oxydation soit de nature chimique avec intervention de l'oxygène plutôt que de nature biologique.

Cette oxydation est dûe à des bactéries autotrophes : les *Thiobactériales*. Les unes, sans pigment, les *Leucothiobactériales* comptent parmi elles les plus connues de ce groupe : les *Beggiatoa*. Appartenant à de nombreux types morphologiques, elles se trouvent principalement dans les eaux où la dégradation de la matière organique est accompagnée de dégagement d'hydrogène sulfuré (étangs, boues...). En présence d'air et d'hydrogène sulfuré, des granules de soufre se déposent dans les bactéries, puis après épuisement des sulfures, ce soufre est lui-même oxydé en sulfates et est rejeté à l'extérieur de la bactérie qui meurt. Le gaz carbonique est essentiel pour le développement de ces chimiosynthétiques qui trouvent leurs besoins énergétiques dans l'oxydation de l'hydrogène sulfuré.

Les bactéries colorées existent également dans ce même groupe : les unes pourpres (exemple : *Chromatium*), les autres vertes (exemple : *Chlorobium*) contrairement aux précédentes, sont des anaérobies strictes. Rencontrées dans les eaux sous diverses formes, elles ont une grande

faculté d'adaptation puisqu'elles sont présentes à la fois dans les eaux thermales et sur les surfaces glacées du pôle. En présence de lumière, elles oxydent l'hydrogène sulfuré avec, pour les pourpres seulement, formation d'un dépôt de soufre à l'intérieur des bactéries. L'oxydation peut se poursuivre jusqu'au stade sulfate pour le *Chromatium*.

La réaction d'oxydation serait analogue à celle de la photosynthèse, mais le soufre y remplacerait l'oxygène.

$$CO_2 + 2\ H_2S = H\ CHO + H_2O + 2\ S$$

Il y aurait une relation entre le pigment de ces bactéries et la chlorophylle des plantes.

Les bactéries vertes préfèrent de plus fortes concentrations de sulfures que les pourpres, aussi se développent-elles en premier ; puis après diminution du taux de sulfures dans le milieu, commence la croissance des bactéries pourpres (BUTLIN, 1953).

b) **Oxydation du soufre et des dérivés soufrés minéraux : thiosulfates, thionates.**

Indépendemment des *Thiobactériales* capables d'oxyder l'hydrogène sulfuré jusqu'au stade des sulfates, existent d'autres bactéries autotrophes spécialisées chimiosynthétiques : les *Thiobacillus* qui peuvent, eux aussi, assurer l'oxydation du soufre ainsi que celle des dérivés soufrés minéraux. Ce sont d'ailleurs des représentants typiques du sol dans lequel ils exercent leur activité : leur rôle est très important. Ces petits bacilles, Gram négatif, généralement mobiles grâce à un flagelle polaire, tirent leur énergie des réactions d'oxydation et empruntent leur carbone au gaz carbonique de l'atmosphère ou aux bicarbonates et carbonates du milieu.

De nombreux microorganismes hétérotrophes, non spécialisés, sont également capables d'oxyder le soufre et les dérivés soufrés minéraux.

1° ORGANISMES RESPONSABLES DE CETTE OXYDATION. BACTÉRIES AUTOTROPHES SPÉCIALISÉES : LES THIOBACILLUS.

Nous ne citerons que les principaux *Thiobacillus* en commençant par les autotrophes stricts aérobies pour finir par les autotrophes facultatifs anaérobies.

Le *Thiobacillus thiooxydans*, aérobie, couramment répandu dans les sols, est strictement autotrophe. Bien que son pH optimum de croissance se situe entre 3 et 4, il peut cependant survivre aux environs de pH 0,6. Il utilise le gaz carbonique comme source de carbone, mais la présence de glucose, mannitol et glycérol augmente légèrement l'efficacité de l'oxydation du soufre. Les carbonates ne peuvent pas remplacer le gaz carbonique car leur présence entraîne une élévation de pH du milieu,

défavorable à cette bactérie. Autotrophe strict, ce *Thiobacillus* fait la synthèse des acides nicotinique et pantothénique, de la biotine, de la riboflavine et de la thiamine.

Le Thiobacillus thioparus, également aérobie autotrophe strict, oxyde le soufre en sulfates, mais plus lentement que le précédent et à un pH voisin de la neutralité ; aussi peut-il utiliser les carbonates. Il est également capable de transformer les thiosulfates en sulfates avec formation de polythionates (di, tri et tetra) comme produits intermédiaires. Plusieurs schémas de réactions furent proposés ; d'après des études récentes de STARKLEY, les thiosulfates seraient oxydés avec production de 60 p. 100 de sulfates et 40 p. 100 de soufre et le milieu s'acidifierait.

$$5Na_2\,S_2O_3 + H_2O + O_2 = 5SO_4Na_2 + SO_4H_2 + 4S$$

Avec le *Thiobacillus novellus* qui est autotrophe facultatif, le soufre n'est pas précipité lors de l'oxydation des thiosulfates en sulfates

$$Na_2\,S_2O_3 + H_2O + O_2 = SO_4Na_2 + SO_4H_2$$

Le *Thiobacillus denitrificans* est différent des autres : c'est un anaérobie facultatif. En aérobiose, il se comporte comme les précédents ; en anaérobiose, il oxyde le soufre ou les composés soufrés minéraux en utilisant les nitrates comme donateurs d'oxygène ; ces derniers sont alors réduits en azote simultanément à l'oxydation du soufre.

$$6NO_3K + 5S + CaCO_3 = 3SO_4K_2 + 2CaSO_4 + 2CO_2 + 3N_2$$
$$5Na_2\,S_2O_3 + 8NO_3K + 2NaHCO_3 = 6SO_4Na_2 + 4SO_4K_2 + 4N_2 + 2CO_2 + H_2O$$

La concentration des nitrates par rapport à celle des thiosulfates doit être faible à cause de la toxicité des nitrites, premier stade de réduction des nitrates.

Le gaz carbonique ne peut servir de source de carbone, car il entraîne la formation d'acide sulfurique nuisible pour cet organisme sensible à l'acidité.

Cette bactérie, largement distribuée dans les eaux, boues et sols est intermédiaire entre les bactéries oxydant le soufre et les dénitrifiants.

Le *Thiobacillus traustweinii* est un anaérobie facultatif pouvant réduire les nitrates comme le précédent. C'est également un autotrophe facultatif utilisant les substances organiques en absence de gaz carbonique.

En somme, il existe tous les genres de Thiobacillus, depuis les autotrophes aérobies stricts jusqu'aux anaérobies autotrophes facultatifs.

HÉTÉROTROPHES NON SPÉCIALISÉS.

L'oxydation du soufre et des thiosulfates peut également être assurée en présence de matière organique par de nombreux microorganismes hétérotrophes non spécialisés : bactéries, champignons, actinomycètes (GUITTONNEAU, 1927).

Ainsi que l'ont signalé divers auteurs (STARKEY, GLEEN et QUASTEL) les tétrathionates seraient des produits intermédiaires formés au cours de cette oxydation des thiosulfates.

2° ROLE DES THIOBACILLUS.

Outre le fait qu'ils fournissent aux plantes des composés soufrés assimilables, leur rôle dans le sol est très important. En leur absence, l'hydrogène sulfuré, produit lors de la dégradation des matières organiques, s'accumulerait et deviendrait toxique pour les racines des plantes.

Ils exercent aussi une action favorable sur la solubilisation des phosphates, lesquels sont rendus plus facilement assimilables par les plantes par suite de la formation d'acide sulfurique (LIPMAN, 1916-1920).

$$(PO_4)_2Ca_3 + SO_4H_2 + 2H_2O = (PO_4H)_2\,Ca_2 + SO_4Ca\ 2H_2O$$
$$(PO_4H)_2\,Ca_2 + SO_4H_2 + 2H_2O = (PO_4H_2)_2\,Ca + SO_4Ca\ 2H_2O$$
$$(PO_4H_2)_2\,Ca + SO_4H_2 + 2H_2O = 2PO_4H_3 + SO_4Ca\ 2H_2O$$

D'après cet auteur, 85 p. 100 du phosphate tricalcique ajouté dans un sol de serre devient assimilable en 30 semaines, et cette solubilisation serait indépendante du pH initial de la terre.

L'activité des *Thiobacillus* entraîne également une amélioration des sols alcalins. L'oxydation du soufre en acide sulfurique neutralise l'alcalinité de ces terres et modifie favorablement leur structure en floculant les colloïdes (RUDOLFS, 1922).

Parallélement à ces actions utiles dans les sols, il en existe d'autres nuisibles telle la corrosion du béton et des pierres causée par l'association de ces *Thiobacillus* avec les *Sulfatoréducteurs*.

4. — Réduction du soufre minéral.

La réduction des sulfates et des composés minéraux soufrés partiellement oxydés n'est pas importante dans les sols arables puisqu'elle a lieu en absence d'oxygène. Néanmoins, elle apparaît dans les terres inondées, dans les sols saturés d'eau (tourbières) ainsi qu'à un moindre degré dans les sols argileux lourds.

a) **Organismes responsables de cette réduction** :

1° AUTOTROPHES FACULTATIFS SPÉCIALISÉS.

Cette réduction du soufre minéral présente un grand intérêt microbiologique : elle est généralementl'œuvre d'un seul groupe de bactéries spécialisées, appelées les *Sulfatoréducteurs* bien que leur action s'étende également aux autres formes soufrées minérales.

Couramment répandues dans les eaux, les dépôts salins et les sols, ces bactéries anaérobies, semblables à des vibrions, généralement mobiles grâce à un flagelle polaire, Gram négatif, peuvent, dans certains cas, revêtir

des formes coccobacillaires ou spirillaires. Classées successivement dans des genres variables suivant les auteurs : *Bacillus, Bacterium, Microspira, Vibrio, Desulphovibrio,* elles appartiennent actuellement au genre *Sporovibrio* d'après la terminologie française avec comme espèce-type le *Sporovibrio desulfuricans.*

Il semble d'ailleurs que les différents genres de *Sulfatoréducteurs* décrits par les auteurs (thermophiles, halophiles) n'en font qu'un finalement, lequel s'adapterait très facilement aux conditions de milieu.

Bien que réputés anaérobies stricts, les *Sulfatoréducteurs* peuvent être actifs dans des zones voisines de l'aérobiose. Certains auteurs ont mis en évidence leur résistance à l'oxygène. Dans les conditions naturelles, leur association avec des aérobies consommateurs d'oxygène peut permettre leur activité.

Malgré leur capacité de croissance autotrophe, les *Sulfatoréducteurs* sont nettement stimulés par le peptone et par l'extrait de levure qui jouent un rôle nutritif (SENEZ, 1951), tandis que les sulfures, la cystéine ou les ions ferreux interviennent comme stimulants en tant qu'agents réducteurs.

Les *Sulfatoréducteurs* réduisent les sulfates, soit en croissance autotrophe avec oxydation d'hydrogène, soit en croissance hétérotrophe avec oxydation de composés organiques. Dans le premier cas, ils se développent en milieu strictement minéral en présence d'azote ammoniacal, de carbone sous forme de bicarbonate ou de gaz carbonique et d'hydrogène, soit gazeux, soit naissant.

Dans le cas des sulfates, la réaction peut s'écrire :

$$SO_4^{=} + 4H_2 = S^{=} + 4H_2O + 60\text{Kcal}$$

Le sulfite serait alors un stade intermédiaire ainsi que l'ont prouvé les expériences de MILLET (1955) faites avec des isotopes radioactifs.

L'utilisation de l'hydrogène gazeux par les *Sulfatoréducteurs* implique l'existence d'hydrogénases, dont l'activité d'après certains auteurs serait importante.

Les *Sulfatoréducteurs* peuvent également avoir une croissance hétérotrophe en présence de nombreux composés organiques, sources de carbone et donateurs d'hydrogène. Leur croissance est alors plus importante qu'en présence d'hydrogène, par contre la réduction des sulfates est plus lente.

Le métabolisme de la réduction des sulfates en présence de divers composés carbonés a fait l'objet de nombreuses études. Voici les réactions de réduction à partir du lactate (couramment utilisé pour la culture des *Sulfatoréducteurs*) et du pyruvate.

$$2CH_3 - CHOH - COOH + SO_4^{=} = 2CH_3\,COOH + 2CO_2 + 2H_2O + S^{=}$$
$$4CH_3 - CO - COOH + SO_4^{=} = 4CH_3\,COOH + S^{=} + 4CO_2$$

D'après Senez (1951), l'oxydation du lactate par le *Sporovibrio desulfuricans* passerait par le pyruvate. La liaison entre l'oxydation des composés organiques (lactate, pyruvate) et la réduction des sulfates serait assurée par un cycle fumaro-succinique (Senez, 1954). Les déshydrogénases intervenant dans l'oxydation des composés organiques, sont indépendantes des enzymes participant à la réduction des sulfates, puisqu'en absence de sulfates les *Sulfatoréducteurs* sont capables d'oxyder le pyruvate avec formation d'acétate, d'éthanol et de gaz carbonique.

2° Hétérotrophes non spécialisés.

Cette réduction peut également être l'œuvre de divers microorganismes : bactéries, champignons, levures. Le *Proteus vulgaris*, d'après Tarr (1933) serait capable de réduire les thiosulfates en sulfures, il en serait de même des Pseudomonas d'après Tanner.

b) **Conséquences des activités des Sulfatoréducteurs.**

Mis à part leur rôle favorable invoqué dans la formation des pétroles et de celle des dépôts géologiques de sulfures métalliques, ils ont souvent une action nuisible dans les sols : ils sont notamment responsables de l'altération des conduites de fer, et, en association avec les *Thiobacillus*, de la corrosion du béton et des pierres de monument.

II. — ALIMENTATION DES PLANTES EN SOUFRE

Cette troisième partie est limitée à l'absorption du soufre par les végétaux. L'étude des transformations des différents composés soufrés, ainsi que celle de leur circulation à l'intérieur de la plante constitueraient à elles seules un chapitre trop important pour être ajouté dans cette troisième partie.

1. — Sources de soufre pour la plante.

1° Les sulfates du sol.

C'est généralement sous forme de sulfates que le soufre est prélevé au sol par les plantes. Celles-ci absorbent très énergiquement les petites quantités de sulfates, mais refusent presque complétement les sulfates en excès, ainsi que le prouvent les essais en pots de Barbier (1937) faits sur blé et betterave : les plantes sont alimentées avec des solutions nutritives où l'on fait varier le rapport Cl/SO_4, tout en maintenant constante la somme des concentrations équivalentaires de ces deux anions. Les concentrations en chlorure et en sulfate varient seulement à l'intérieur des limites rencontrées dans les solutions du sol. L'auteur ne constate pas pour le soufre de consommation de luxe comme c'est le cas pour le chlore ; cela ne signifie pas que la teneur en soufre d'une plante demeure constante ;

au contraire, elle est variable suivant les années, suivant le stade de développement végétatif. D'après VINCENT (1936), les beoins des végétaux en soufre croissent jusqu'à leur maturité. Cette teneur en soufre dépend également des besoins physiologiques propres à chaque espèce végétale ; faible chez les graminées, elle est très élevée chez les légumineuses et surtout chez les crucifères (sinigroside, sinalboside).

D'après HOFMANN (1957), l'assimilation du sulfate est très rapide. La présence de sulfate radioactif dans les feuilles de jeunes plantes peut être constatée 24 heures seulement après son apport aux plantes.

2° L'anhydride sulfureux de l'atmosphère.

Les feuilles des plantes seraient également capables de subvenir à l'alimentation soufrée de celles-ci, Elles peuvent, en effet, absorber le SO_2 de l'air, mais d'une façon toutefois moins efficace que les racines vis-à-vis des sulfates (THOMAS et coll., 1943). Si la plante dispose en même temps de sulfate assimilable par les racines et d'anhydride sulfureux à prélever par les parties aériennes, elle s'adresse de préférence au sulfate surtout en présence d'une concentration élevée de celui-ci dans la solution nutritive. Des fumigations prolongées avec SO_2 à faibles concentrations ne modifient pas beaucoup le pH du suc cellulaire dans les feuilles dont les bases organiques exercent un effet tampon (THOMAS et coll., 1944). L'anhydride sulfureux absorbé serait transformé surtout en sulfates ; un peu de cystine et quelques composés soufrés organiques solubles ou non seraient également retrouvés.

D'autres expériences de ces mêmes auteurs ont porté sur du blé et de l'orge cultivés antérieurement sur des milieux déficients en soufre. Du S^{35} est ensuite fourni à ces plantes, soit sous forme de sulfate de sodium dans la solution nutritive, soit sous forme de SO_2 dans l'air (THOMAS et coll., 1944) : l'absorption de l'anhydride sulfureux très forte dans les feuilles est suivie d'une diminution de la concentration quand le soufre marqué est réparti dans toute la plante. De même pour le sulfate de sodium marqué, l'absorption est rapide, la concentration maximum dans les feuilles est atteinte en 8 à 10 jours, puis elle diminue. Dans le cas d'un maïs, cultivé antérieurement sur des solutions suffisamment pourvues en soufre, ces mêmes auteurs ont constaté une absorption du sulfate ou de l'anhydride sulfureux radioactif plus lente que chez le blé et l'orge dont les croissances avaient débuté dans un milieu déficient en soufre. De nombreuses similitudes existent donc entre les deux sources de soufre envisagées.

Pour compléter ces expériences, il faut mentionner les essais de FRIED (1948) beaucoup plus rigoureux que les précédents. En effet dans les expériences de THOMAS (1944), les milieux de croissance des racines n'ont pas été isolés de l'anhydride sulfureux de l'atmosphère. Une

objection peut alors être faite : l'anhydride n'a peut-être pas été absorbé tel quel par la plante, il peut passer dans le milieu de culture, s'y transformer alors en sulfate et être finalement utilisé sous cette forme par le végétal. Dans l'expérience de FRIED, les racines sont isolées des parties supérieures, mises de plus dans une enceinte close. FRIED arrive finalement au même résultat que ses prédécesseurs à savoir, que les feuilles de luzerne sont capables d'utiliser l'anhydride sulfureux de l'atmosphère, lequel est ensuite transformé en composés soufrés organiques.

3° Le soufre.

Il faut signaler à ce sujet plusieurs essais, en particulier celui de BOISCHOT (1938) qui a obtenu pour des cultures maraîchères des accroissements de rendement tout à fait significatifs avec du soufre en fleur et avec du soufre colloïdal. Il faut cependant être prudent dans l'interprétation des résultats : avant d'être absorbé par les plantes, le soufre a été oxydé biologiquement en sulfates.

Plus récemment, TURRELL a pu mettre en évidence l'utilisation directe du soufre par les plantes : il a constaté, en effet la pénétration de la poudre de soufre marqué dans l'écorce des fruits et la formation de protéines soufrées marquées.

Le même auteur (1955) a également prouvé l'absorption de soufre élémentaire en poudre par les feuilles des plantes. Il est parti, pour son expérience, d'une branche en y d'un citronnier. L'une des branches de l'y est protégée par de la cellophane : seul un petit trou permet la transpiration. De la poudre de S^{35} est pulvérisée sur les parties supérieure et inférieure de l'autre branche de l'y et le tout est recouvert de cellophane. L'auteur constate non seulement une pénétration du soufre élémentaire dans les feuilles, mais encore sa participation au métabolisme : des protéines marquées sont en effet retrouvées dans les feuilles saupoudrées. On peut toutefois objecter que la poussière de soufre radioactif a pu être mal éliminée avant le dosage ou bien que des traces d'acide sulfurique radioactif ont pénétré dans les feuilles lors de leur lavage. Il peut cependant être rétorqué à tout ceci qu'il existe du soufre radioactif dans la branche de l'y non traitée, ce qui ne met plus en doute le fait que le soufre en poudre est absorbé directement par les feuilles. A partir de là, il est transporté vers les autres parties de la plante sous forme de sulfates.

4° Le soufre organique.

Aux trois sources de soufre précitées s'en ajoute une quatrième : le soufre organique. D'après les expériences de MILLER (1947), la D L méthionine peut être utilisée par des tomates et du tabac cultivés sur du sable carencé en soufre. L'addition de cet acide aminé aux solutions nutritives entraîne le développement des plantes, ainsi qu'un accroissement de

leur teneur en sulfates lesquels proviennent de l'oxydation de la D L méthionine dans le végétal lui-même.

La cystéine peut, elle aussi, être utilisée directement par les plantes sans oxydation préalable (Averna Sacca, 1952) : les tomates qui reçoivent 250 mg de cystéine par plante et par semaine ont une apparence normale, tandis que des symptômes de carence en soufre apparaissent sur ces mêmes plantes en absence de soufre organique.

HELLER, plus tard (1955) est venu confirmer ces résultats en étudiant la croissance des tissus de carotte en présence de plusieurs composés soufrés minéraux et organiques : cystéine, glutathion, méthionine et taurine. Seule, cette dernière est toxique ; les autres aux doses non trophiques, peuvent être assimilés par des tissus végétaux sains. A ce sujet, des résultats négatifs avaient été trouvés précédemment par NICCHELL (1950), mais il s'agissait de tissus pathologiques.

2. — Absorption du soufre et interactions avec les autres éléments.

1° Interaction avec les anions.

L'absorption accrue d'un élément entraîne une diminution de l'absorption d'un autre élément puisqu'on sait que le rapport : $\frac{\text{cation } (Ca + Mg + K + Na)}{\text{anions } (N + Cl + S + P)}$ absorbés est constant pour une plante (BEAR, 1950, 1953). Ainsi, des apports importants de chlorure de potassium entraînent une forte absorption du chlore, et réduisent considérablement les sulfates dans la plante, sans s'opposer nécessairement à une augmentation du rendement. Dans des terres pauvres en soufre, l'application de fortes doses de chlorure peut contribuer à aggraver l'insuffisance de cet élément.

Il faut signaler aussi les antagonismes soufre-sélénium. Ainsi, la pénétration du sélénium dans les plantes et les toxicités qui peuvent en découler dépendent de la quantité de soufre assimilable d'un sol. Dans les sols naturellement sélénifères, il est conseillé d'ajouter du soufre ou du gypse, afin d'inhiber l'absorption de quantités de sélénium dangereuses pour les plantes (FRANKE et coll., 1937). En présence d'un excès de sélénium, les plantes présentent un aspect chlorotique qui se maintient jusqu'à ce que le rapport S/Se dans le sol soit égal à 1/12 (HURD KARRER, 1933).

L'absorption du soufre paraît également liée à la présence d'azote. Dans un sol pauvre en soufre et carencé en azote, les apports de soufre restent sans réponse. Par contre, lorsque le sol est riche en nitrates, le soufre total des plantes serait considérablement accru.

2° Intéraction avec les cations.

Quant aux cations, ils interviennent également dans l'alimentation soufrée des plantes. Ainsi l'absorption des ions sulfates des différents sels n'est pas identique, mais dépend des cations : elle croît avec la série : Ca, Mg, Na, NH_4 et K, ce qui suffit à expliquer sa plus faible valeur dans un sol limoneux que dans un sol sableux par suite de la plus forte teneur en calcium du premier sol.

D'après HOFMANN (1957), les sulfates soutiennent l'action du potassium sur les phénomènes d'assimilation. En cas d'excès de potassium, les sulfates agissent même comme régulateurs et rétablissent l'équilibre métabolique.

RÉSUMÉ

Le soufre est un élément vital pour les plantes ; les réserves du sol, les engrais et les eaux de pluie suffisent généralement à satisfaire les besoins des cultures en cet élément, sauf dans les cas particuliers de terres très pauvres ou de cultures exigeantes (telles les légumineuses et les crucifères) où des apports spéciaux de soufre doivent être faits, afin d'éviter l'apparition de carences.

Mis à part dans quelques sols arides où sont présentes d'importantes quantités de sulfates, la forme organique est la forme prédominante du soufre dans les terres, et des relations ont pu être établies entre ce soufre et le carbone et l'azote des sols.

Le soufre et ses composés subissent dans le sol de nombreuses transformations dans lesquelles interviennent divers microorganismes : minéralisation du soufre de la matière organique des sols, oxydation du soufre minéral, et dans certains cas réduction de ce soufre minéral. L'ensemble de toutes ces transformations complété par l'absorption du soufre par les végétaux et par l'ingestion de ceux-ci par les animaux, constitue le cycle biologique du soufre dans lequel cet élément passe alternativement de la forme organique à la forme minérale et vice-versa.

L'approvisionnement des plantes en soufre se fait généralement à partir des sulfates du sol ; cependant des composés soufrés organiques seraient également susceptibles d'être absorbés. De plus des techniques modernes ont permis de mettre en évidence l'utilisation possible par les végétaux du soufre en poudre (par l'écorce des fruits, les feuilles) et de l'anhydride sulfureux de l'atmosphère.

SUMMARY

Sulphur compounds in the soil and their evolution, relationship to the microflora and utilization by plants.

Reserves of sulphur in the soil, fertilizers and rainfall are generally sufficient to satisfy the requirement by plants for this vital element, except in deficient soils and in relation to exacting crops (such as legumes and crucifers) where only additional application of sulphur will prevent the development of deficiency.

Except for some arid soils which contain high amounts of sulphates, sulphur in soil occurs predominantly in organic form, and a relationship exists between this sulphur and the carbon and nitrogen levels in the soil.

Sulphur and its compounds undergo in soil a number of transformations by various micro-organisms, such as mineralization of organic sulphur, oxidation of mineral sulphur, and sometimes sulphate reduction. These transformations and uptake of sulphur by plants and ingestion of the plants by animals complete the biological sulphur-cycle in which this element alternates between the organic and mineral form.

The sulphur requirement of plants is generally covered by the sulphates in soil, but organic compounds may also be taken up. Recent investigations indicated the possible utilization by plants (fruit trees, leaves) of powdered sulphur and of sulphur dioxyde from the atmosphere.

Соединения серы в почве и их эволюция; соотношение с микрофлорой; использование растениями.

M[me] СИМОН-СИЛЬВЕСТР (Центральная Агрономическая Станция, Версаль)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Сера является для растений жизненным элементом; почвенные запасы, удобрения и дожди обычно удовлетворяют потребность культур в этом элементе в достаточной мере, за исключением частых случаев почв очень бедных или культур требовательных (как бобовые и крестоцветные), для которых специальное внесение серы должно быть произведено, чтобы избежать появление голода.

За исключением некоторых пустынных почв, в которых находятся значительные количества сульфатов, органическая форма серы является доминирующей в почвах, и оказалось возможным определить отношения между этой серой и между почвенным углеродом и азотом.

Сера и ее соединения подвергаются в почве многим преобразованиям, в которых участвуют различиные микроорганизмы : минерализация серы органического вещества почвы, окисление минеральной серы и, в некоторых случаях, восстановление этой минеральной серы. Совокупность всех этих преобразований, усложненная поглощением серы растениями и поеданием растений животными, составляет биологический цикл серы, в котором этот элемент переходит из органической формы в минеральную, — и обратно.

Питание растений серой происходит обычно за счет почвенных сульфатов; тем не менее, органические соединения могли бы равным образом быть усвоены. Сверх того, современные методы позволили показать возможное использование растениями серы в порошке (корой фруктов, листьями) и сернистого ангидрида атмосферы.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Schwefelverbindungen des Bodens und ihre Weiterentwicklung ; Beziehungen zur Mikroflora ; Verwendung durch die Pflanzen.

Der Schwefel ist ein lebenswichtiges Element für die Pflanzen ; ausser dem besonderen Fall von sehr armen Böden oder anspruchsvollen Kulturen (Leguminösen und Kreuzblütler) die spezieller Schwefelgaben bedürfen um das jeweilige Erscheinen von Mängeln zu vermeiden, so genügen im Allgemei-

nen die Bodenreserven, Dünger und Regenwässer um die Bedürfnisse der Pflanzen in diesem Element zu befriedigen.

Mit Ausnahme einiger Trockenböden wo starcke Sulfatmengen vorhanden sind, so ist in den Böden, die organische Form des Schwefels die vorherrschende und es konnten Beziehungen festgelegt werden zwischen diesem Schwefel und dem Kohlenstoff sowie dem Stickstoff der Böden.

Der Schwefel und seine Verbindungen erfahren zahlreiche Umwandlungen im Boden an welchen verschiedene Mikroorganismen sich beteiligen : Mineralisierung des an organische Materie gebundenen Bodenschwefels, Oxydation des mineralen Schwefels und in gewissen Fällen Reduktion des letzteren. Das Gesamtbild dieser Umwandlungen, vervollständigt durch die Schwefelaufnahme der Pflanzen und die Verzehrung letzterer durch Tiere, bildet den biologischen Kreislauf des Schwefels in welchem dieses Element wechselweise von der organischen Form in die mineralische und umgekehrt, übergeht.

Im allgemeinen erfolgt die Schwefelversorgung der Pflanzen durch die Bodensulfate, jedoch sind organische Verbindungen ebenfalls aufnehmbar.

Modernere Verfahren haben weiterhin die Aufnahmemöglichkeit von Schwefelpulver (durch Fruchtschale, Blätter) und von Schwefeldioxyd der Atmosphäre durch die Pflanze, bestätigt.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AVERNA SACCA (R.) et MALAVOLTA (E.). — Absorption of organic sulfur by tomato. *Biolog. Abst.*, **26**, 2036, 1952.

BALKS (R.) et WEKRMANN (O.). — Influence de différents cations sur l'absorption du sulfate par le seigle. *Bodenk. und Pflanzenernähr.*, **31**, p. 129-137, 1943.

BARBIER (G.) et CHABANNES (J.). — Observation sur la rétention de l'ion SO_4 et les formes de S dans le sol. *Ann. Agr.*, p. 145-155, 1944.

BARBIER (G.). — Action des chlorures et sulfates sur la nutrition minérale des plantes. *C. R. Ac. Agr.*, **123**, p. 699-706, 1937.

BARJAC (H. de) et POCHON (J.). — Appréciation de la microflore tellurique anaérobie active sur le soufre organique. *Ann. Inst. Past.*, **89**, 5, p. 591-593, 1955.

BEAR (F. E.). — Cation and anion relation in plants and their bearing on crop quality. *Agron. J.*, **42**, p. 176-178, 1950.

BERTRAND (G.) et SILBERSTEIN (L.). — Sur le dosage du soufre contenu dans la terre arable. *Ann. Agr.*, p. 71-77, 1927.

BERTRAND (G.) et SILBERSTEIN (L.). — Teneur du soufre de quelques sols cultivés. *C. R. Ac. Sc.*, 184, p. 1388-1390, 1927. *C. R. Ac. Agr.*, **13**, p. 690-691, 1927.

BOISCHOT (P.) et DROUINEAU (G.) — Sur l'action fertilisante du S élémentaire dans la culture maraîchère en sols calcaires. *C. R. Ac. Agr.*, p. 336-340, 1938.

BUNKER (H. J.). — Revue de physiologie et de biochimie des bactéries du soufre. *Chemistry Research, Special report nº* 3 (20 p.), 1939.

BUTLIN (K. R.). — The bactérial sulfur cycle. *Research*, **6**, p. 184-200, 1953.

CHESNIN (L.) et YIEN (C. H.). — Turbidimetric determination of available sulfates. *Soil Sc. Soc. of Amer. proceed.*, XV, p. 149-151, 1950.

CONRAD (J. P.). — Sulfur fertilization in California and some related factors. *Soil Science*, **70**, p. 43-54, 1950.

DEMOLON (A.) et BASTISSE (E. M.). — Evolution et bilan du S dans un sol en place. *C. R. Ac. Sc.*, **212**, p. 1002-1005, 1941.

ENSMINGER (L. E.). — Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama soils. *Soil Sc. Soc. of Amer. proceedings*, **18**, 3, p. 259-264, 1954.

EVANS (Ch. A.) et ROST (C. O.). — Total organic sulfur and humus sulfur of Minnesota soils. *Soil Sc.*, **59**, p. 125-137, 1945.

FRANKE (H.), KURT (W.) et PAINTER (E. P.). — Effect of sulfur additions on seleniferous soils. *Ind. Eng. Chem.*, **29**, p. 591-595, 1937.

FRIED (M.). — The absorption of sulfur dioxide by plants as shown by the use of radioactive sulfur. *Proc. Soil Sc. Soc. Amer.*, p. 135-138, 1948.

GOLDSCHMIT (W. B.). — The total sulfur content of some cultivated Lowveld soils and its probable relation to profitable crop production. *S. Afr. J. Sc.*, **47**, p. 261-262, 1951.

GUITTONNEAU (G.). — Sur la formation d'hyposulfite aux dépens du soufre par les microorganismes du sol. *C. R. Ac.*, **180**, p. 1142-1144, 1925.

GUITTONNEAU (G.). — Sur la transformation du soufre en sulfate par voie d'association microbienne. *C. R. Ac. Sc.*, **181**, p. 261-262, 1925.

HELLER (R.). — De quelques composés du soufre assimilables par les tissus végétaux cultivés in vitro. *C. R. Ac. Sc.*, **241**, 2, p. 234-236, 1955.

HOFMANN (Ed.). — Le soufre dans les problèmes de fumure. *Circ. Inf. des Potasses d'Alsace*, nº 148, p. 392-395, 1957.

HURD KARRER (A. M.). — Inhibition of selenium injury to wheat plants by sulfur. *Science*, **78**, 2, 2033, p. 560, 1933.

JORDAN (H. V.) et BARDSLEY (Ch. E.). — Response of crops to sulfur on southeastern soils. *Soil Sc. Society of Amer. proceed.*, **22**, p. 254-256, 1958.

KAMPRATH (E. J.), NELSON (W. L.) et FITTS (J. W.). — Influence of pH, sulfate and phosphate concentrations on the adsorption of sulfate by soils. *Soil. Sc. Soc. of Amer. proceedings*, **20**, 4, p. 463-466, 1956.

KEILING (J.) et GUITTONNEAU (G.). — L'évolution et la solubilisation du soufre élémentaire dans la terre arable. *Ann. Agr.*, p. 690-725, 1932.

KREITSCHMER (A. E.), TOTH (S. J.) et BEAR (F. E.). — Effect of chloride versus sulfate ion on nutrient ion absorption by plants. *Soil Science*, **76**, p. 193-199, 1953.

LIPMAN (J. G.) et Mac LEAN (H.). — The oxidation of sulfur in soils as a means of increasing the availability of mineral phosphates. *Soil Science*, **1**, p. 533-540, 1916.

LIPMAN (J. G.), Mac LEAN (H.) et LINT (M. C.). — Sulfur oxidation in soils and its effect on the availability of mineral phosphates. *Soil Sc.*, **2**, p. 499-538, 1916.

LIPMAN (J. G.) et JOFFE (J. S.). — Influence of initial reaction on the oxidation of sulfur and the formation of available phosphates. *Soil Science*, **10**, p. 327-332, 1920.

MILLER (L. P.). — Utilization of DL methionine as a source of sulfur by growing plants. *Contri. Boyce Thomson Inst.*, **14**, p. 443-456, 1947.

MILLET (J.). — Le sulfite comme intermédiaire dans la réduction du sulfate par Desulphovibrio desulfuricans. *C. R. Ac. Sc.*, p. 253-255, 1955.

NICKELL (L. G.) et BURKHOLDER (P. R.). — A typical growth of plants. II growth in vitro of virus tumors of rumex in relation to temperature, pH and various sources of nitrogen, carbon and sulfur. *Amer. Jour. Bot.*, **37**, p. 538-547, 1950.

NIGHTINGALE (G. T.), SHERMERHORN (L. G.) et ROBBIN (W. R.). — Effect of S deficiency in metabolism of tobacco. *Plant Phys.*, **7**, p. 565-595, 1932.

PERRIER (M.). — Le soufre en biologie — son importance dans la fertilisation. *Industrie Chimique*, **39**, nº 416, p. 65-70, 1952.

RUDOLFS (W.). — Sulfur oxidation in black alkali soils. *Soil Sc.*, **13**, p. 215-230, 1922.

SENEZ (J. C.). — Étude comparative de la croissance de Sporovibrio desulfuricans sur pyruvate et sur lactate de soude. *An. Inst. Past.*, **80**, p. 395-408, 1951.

SENEZ (J. C.). — Fermentation de l'acide pyruvique et des acides dicarboxyliques par les bactéries anaérobies sulfatoréductrices. *Bull. Doc. Chim. Biol.*, **36**, p. 541-552, 1954.

STARKEY (R. L.). — Relations of microorganisms to transformations of sulfur in soils. *Soil Science*, **70**, p. 55-65, 1950.

STARKEY (R. L.), SEGAL (W.) et MANAKER (R. A.). — Sulfur products of the decomposition of methionine and cystine by microorganisms. *Atti del VI Congresso intern. di microbiologia*, vol. I, 1, p. 256-257, 1953.

STEPHENSON (M.) et STICKLAND (L. H.). — The reduction of sulfate to sulfur by molecular hydrogen. *Biochem. Jour.*, **25**, 1, p. 215-220, 1931.

TARR (H. L. A.). — The enzymic formation of hydrogen sulfide by certain heterotrophic bacteria. *Biochem. Jour.*, **27**, p. 1869-1874, 1933.

THOMAS (M. D.), HENDRICKS (R. H.), COLLOI (T. R.) et HILL (Geo. R.). — The utilization of sulfate and sulfur dioxide for the sulfur nutrition of alfalfa. *Plant Physiology*, p. 345-371, 1943. — Some chemical reactions of sulfur dioxide after absorption by alfalfa and sugar beets. *Plant Phys.*, p. 212-226, 1944.

THOMAS (M. D.), HENDRICKS (R. H.), BRYNER (L. C.) et HILL (G. R.). — A study of the sulfur metabolism of wheat, barley and corn using radioactive sulfur. *Plant Phys.*, p. 227-244, 1944.

TURRELL (F. M.) et WEBER (J. R.). — Elemental sulfur dust, a nutrient for lemon leaves. *Science*, 122, p. 119-120, 1955.

VINCENT (V.), SARAZIN (J.) et HERVIAUX (J.). — Le soufre dans l'Agriculture bretonne. *Ann. Agr.*, p. 20-40, 1936.

631.461 : 577.16

LES BESOINS EN VITAMINES DU GROUPE B DES BACTÉRIES DU SOL

PAR

J. RIVIÈRE

Laboratoire de Recherches, Chaire de Microbiologie,
Institut National Agronomique, Paris

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Introduction.

II. — Les vitamines du groupe B dans le sol.

1. Historique.
2. Détermination de la teneur en vitamines du sol.
3. Origine des vitamines du sol.
 a) Apport de vitamines dans les produits d'excrétion des animaux et des végétaux.
 b) Synthèse par les micro-organismes du sol.
 c) Décomposition microbienne des matières animales et végétales dans le sol.
 d) Dynamique des vitamines dans le sol.

III. — Besoins en vitamines du groupe B des Bactéries du sol.

1. Technique employée.
 a) Isolement et dénombrement des Bactéries nécessitant des vitamines du groupe B.
 b) Groupes nutritionnels.
2. Bactéries nécessitant de la vitamine B_{12}.
3. Bactéries nécessitant du « Terregens factor ».
4. Besoins spécifiques de la microflore bactérienne prédominante du sol.
5. Effet rhizosphère sur les Bactéries nécessitant des vitamines du groupe B.

IV. — Conclusions.

Bibliographie.

I. — Introduction

Une revue bibliographique de Metz (1955) montre que l'étude des substances antibiotiques dans le sol est beaucoup plus facile à réaliser que celle des facteurs de croissance, ce qui explique le petit nombre de travaux consacrés à cette dernière question. Mais on verra qu'elle peut présenter autant d'intérêt.

Avec Lwoff (1943), il faut définir ce que l'on entend par besoin en vitamines : ce sont des métabolites essentiels dont certains micro-organismes sont incapables de réaliser la synthèse, en l'absence desquels il n'y a aucune crois-

sance ; dans ces conditions, on élimine tous les cas où la vitamine est un facteur d'accélération de la croissance, lorsqu'il y a une synthèse lente par les micro-organismes, mais insuffisante pour obtenir une croissance normale. Avec cette définition précise, il y a un certain nombre de caractères qui permettent d'affirmer qu'une vitamine du groupe B est nécessaire pour une Bactérie du sol :

1. — Action à des concentrations très faibles, de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-10}.

2. — Effet rigoureusement quantitatif sur la croissance pour les faibles concentrations.

3. — Constance des besoins pour une souche donnée.

4. — Spécificité rigoureuse.

Le plan de cette mise au point consiste à mettre en évidence la présence des vitamines dans le sol, à déterminer leur origine, leur dynamique, puis à voir quels sont les besoins en vitamines du groupe B des Bactéries du sol, et le rôle de l'effet rhizosphère sur ces Bactéries.

II. — Les vitamines du groupe B dans le sol

1. Historique.

Depuis longtemps on savait que l'extrait de terre exerçait une action favorable sur la croissance de nombreux micro-organismes, mais ce n'est que depuis 1937 que SANBORN a observé que l'extrait aqueux d'un sol, après enfouissement d'une culture, stimulait la croissance d'un micro-organisme cellulolytique, *Cellulomonas folia*. En 1935, PRINGSHEIM montre que l'extrait de terre favorise la croissance de nombreux Flagellés et pense qu'il s'agit d'une substance faisant partie du complexe appelé « bios ». La même année LWOFF et LEDERER trouvent que l'extrait de terre stimule la croissance de *Polytomella agilis* par suite d'un apport de facteurs de croissance, et non par les substances humiques ou les sels minéraux qu'il contient. En 1939, LILLY et LEONIAN utilisent des souches de Champignons ayant des besoins spécifiques en vitamine B_1 nécessitant soit la molécule complète de la thiamine (*Phytophtora erythroseptica*), soit les deux composants, pyrimidine et thiazol (*Phycomyces blakesleeanus*), soit un des deux seulement (*Mucor ramannianus* et *Phythiomorpha gonapodioides*) et montrent que l'extrait de terre permet la croissance dans tous les cas. Avec *Sordaria fimicola*, ils décèlent la présence de biotine.

2. Détermination de la teneur en vitamines du sol.

LILLY et LEONIAN (1939) indiquent que la thiamine et la biotine se trouvent surtout à la surface du sol, mais qu'il y en a encore à une certaine profondeur, ce qui laisse penser qu'elles résistent au lessivage. MULLER (1941), dans de nombreux sols de prairies et de forêts, signale la présence des vitamines suivantes : aneurine, lactoflavine, pyridoxine, inositol, et acide nicotinique. D'après SCHOPFER (1943), on trouve de grandes quantités de thiamine à la surface de divers sols provenant de forêts, de prairies et de champs cultivés. CARPENTER (1943) observe la présence de riboflavine dans de nombreux sols, la teneur variant corrélativement avec le taux de matière organique. La première étude quantitative est faite par ROULET, en 1948, avec l'aneurine et la biotine ; les teneurs variant :

a) Suivant la profondeur, comme l'indique le tableau I.

TABLEAU I

Teneur en biotine et en aneurine d'un sol suivant la profondeur du prélèvement.

Profondeur en cm	Teneur en m γ (10^{-6} mg) par g de terre	
	Biotine	Aneurine
10	0,62	19,3
20	0,39	8,6
30	0,27	6,2
50	0,23	2,9

b) Suivant la saison :

Il y a une augmentation de la teneur en automne, une diminution en hiver. ROULET et SCHOPFER (1950) mettent en évidence la présence de nombreuses autres vitamines du groupe B dans les sols (riboflavine, inositol, pyridoxine, acide nicotinique, acide *p*-aminobenzoïque).

SCHMIDT et STARKEY (1951), dans un grand nombre de sols cultivés ou non, trouvent des teneurs très variables en riboflavine, de 10 γ pour 100 g dans un champ de Maïs, à 515 γ dans une forêt de Conifères. Tous ces travaux ont été faits à l'aide des méthodes de dosages microbiologiques après avoir extrait les vitamines au moyen de divers agents chimiques : il semble que la technique la plus simple et la plus efficace consiste à tester directement une suspension aqueuse de terre (2,5 p. 100) dans les divers milieux employés pour ces dosages microbiologiques. LOCHHEAD et THEXTON (1951-1952) montrent que l'on peut remplacer l'extrait de terre par la vitamine B_{12} : LOCHHEAD et BURTON (1956) en trouvent de 2 à 15 mγ par g de terre. Un autre facteur hydrosoluble que l'on peut rapprocher des vitamines du groupe B est le « Terregens factor » (T F) découvert par LOCHHEAD et BURTON (1953), BURTON et LOCHHEAD (1953), BURTON, SOWDEN et LOCHHEAD (1954) : il est indispensable pour les Bactéries exigeantes dont le type est *Arthrobacter terregens* qui nécessitent de l'extrait de terre, mais ne peuvent se développer en présence seulement de vitamines du groupe B ou d'extrait de levure ajoutés dans un milieu de base. Dans le sol, LOCHHEAD et BURTON (1956) en décèlent environ 150 mγ par g. Ce facteur ne peut être remplacé par des vitamines du groupe B, des bases puriques ou pyrimidiques, ou d'autres facteurs de croissance connus, à l'exception de l'hématine qui donne une réponse partielle, ou de l'extrait de foie dont l'action favorisante n'est pas due à la présence de vitamine B_{12}. Partiellement purifié à partir du liquide métabolite de certaines Bactéries du sol comme *Arthrobacter pascens*, il montre une activité à partir de 0,1 p. p. m.

3. **Origine des vitamines dans le sol.**

D'après MULLER (1941), l'origine des vitamines dans le sol est variée et provient soit de la synthèse par les micro-organismes auxoautotrophes, soit de la décomposition microbienne de matières animales et végétales riches en vitamines, soit d'un apport extérieur dans les produits d'excrétion des animaux et des végétaux. Ces diverses sources seront passées en revue et l'on verra ensuite qu'il est possible d'avoir une idée du comportement des vitamines dans le sol.

a) *Apport de vitamines dans les produits d'excrétion des animaux et des végétaux.*

Pour ROULET et SCHOPFER (1950), une source importante de vitamines est le fumier qui peut contenir jusqu'à 1,2 γ de biotine et 11 γ de thiamine pour 100 g. WEST (1939) montre que certaines vitamines peuvent être excrétées par les racines : ainsi il satisfait les besoins en thiamine et en biotine de Bactéries tests (*Staphylococcus aureus* et *Rhizobium trifolii*) en renforçant un milieu de base avec de l'eau ayant été en contact avec des jeunes racines de Lin ou de Tabac cultivés aseptiquement, ce qui lui fait conclure que ces racines excrètent les vitamines en question. En 1952, MESHKOV les retrouve dans les excrétions du Pois et du Maïs. En fait, l'excrétion de vitamines par les racines est controversée, et il semble qu'elle soit liée à des processus du métabolisme de la germination et distincte de l'excrétion normale des racines de plantes plus âgées, d'après RIVIÈRE (1959).

b) *Synthèse par les micro-organismes du sol.*

Pour de nombreux auteurs de l'école canadienne (LOCHHEAD et ses collaborateurs), la synthèse des vitamines du groupe B par les micro-organismes du sol apparaît être une source importante, s'expliquant par le fait que de nombreux micro-organismes de la flore intestinale qui ont cette propriété sont incorporés dans le sol, en particulier avec le fumier. Une revue de DARKEN (1953) signale un grand nombre de Bactéries du sol capables de synthétiser la vitamine B_{12}, mais ce sont LOCHHEAD et THEXTON (1952) qui démontrent de façon écologique que les Bactéries du sol synthétisant cette vitamine permettent la croissance des Bactéries la nécessitant : les filtrats de culture des premières souches ayant une action vis-à-vis des secondes, proportionnelle à la quantité de vitamine B_{12} produite dosée par une souche test de *Lactobacillus leichmannii*. De la même façon LOCHHEAD et BURTON (1953), avec le « Terregens factor » (T F), montrent un autre exemple de la dépendance de Bactéries du sol vis-à-vis de facteurs essentiels fournis par d'autres : les filtrats de culture de certaines Bactéries du sol comme *Arthrobacter pascens*, ayant des besoins simples satisfaits dans un milieu minéral additionné de glucose, peuvent remplacer l'extrait de terre pour la croissance d'*Arthrobacter terregens* qui donne une réponse à des doses de T F de l'ordre de 1 mγ par litre. En 1957, LOCHHEAD détermine avec 316 cultures bactériennes isolées d'un sol témoin ou de la rhizosphère de l'Orge et du Seigle les proportions relatives de celles capables de synthétiser les vitamines suivantes (thiamine, biotine, riboflavine, vitamine B_{12} et T F) : il note l'action du filtrat de la culture de chaque couche sur la croissance de micro-organismes tests isolés du sol et choisis d'après leurs besoins spécifiques. Les résultats sont donnés dans le tableau II.

Dans tous les sols, la riboflavine est synthétisée par le plus grand pourcentage de souches isolées, suivie par la thiamine et la vitamine B_{12}, les plus petits pourcentages étant notés avec la biotine et le T F. La moitié des souches isolées du sol témoin et une proportion plus élevée de celles provenant de la rhizosphère des deux plantes étudiées, synthétisent un ou plusieurs des facteurs de croissance testés. Avec la vitamine B_{12} et le T F, il n'y a pas d'effet rhizosphère net ; par contre, dans la rhizosphère de l'Orge, les autres pourcentages sont nettement plus forts que dans le sol témoin. Cependant, dans tous les cas, comme le nombre total des Bactéries est beaucoup plus élevé dans la rhizosphère, les nombres absolus des Bactéries capables de synthétiser ces facteurs de croissance sont beaucoup plus importants dans le sol voisin des racines que dans le sol éloigné ou témoin.

Il faut remarquer que ces résultats indiquent seulement le pouvoir potentiel de la microflore indigène d'un sol pour synthétiser ces vitamines et non le fait qu'elle les synthétise effectivement. Mais il n'y a aucune raison de penser que les conditions du sol ne permettent pas de réaliser ces synthèses.

c) *Décomposition microbienne des matières animales et végétales dans le sol.*

CARPENTER (1943) estimait que c'était la principale source de vitamines dans le sol. A cette époque, on savait peu de choses sur la résistance des vitamines aux attaques microbiennes et, quand on ajoutait des vitamines dans un milieu de culture, on croyait généralement qu'elles étaient absorbées telles quelles par les Bactéries et utilisées comme facteurs de croissance : en fait, c'est ce qui devait se passer dans le sol selon SCHOPFER (1943). Or, dès 1943, FOSTER isole du sol une Bactérie, *Pseudomonas riboflavinus*, qui décompose rapidement la riboflavine, oxydant complètement le groupe ribose et laissant intact le reste de la molécule ; MIRICK (1943) trouve qu'une autre

TABLEAU II

Présence dans le sol témoin ou la rhizosphère des Bactéries capables de synthétiser divers facteurs de croissance.

Facteur produit	Sol témoin		Rhizosphère du Seigle		Rhizosphère de l'Orge	
	% du nombre total de Bactéries	millions par g	% du nombre total de Bactéries	millions par g	% du nombre total de Bactéries	millions par g
Thiamine	35,5	41,1	32,4	374,7	56,7	1487,0
Biotine	19,6	22,7	15,2	175,8	32,7	857,6
Riboflavine ...	39,2	45,4	35,2	407,1	67,3	1765,0
Vitamine B 12	29,9	34,6	33,3	385,5	34,6	907,4
Terregens factor	22,4	25,9	19,0	218,8	25,0	655,6
Un ou plusieurs facteurs	50,5	58,5	59,0	682,4	81,7	2142,6

Bactérie du sol oxyde l'acide p. aminobenzoïque en donnant CO_2, NH_3 et H_2O comme produits terminaux ; d'autres travaux de WILLIAMS et KOSER (1947), et de METZGER (1947) montrent que certaines Bactéries isolées du sol décomposent activement l'acide nicotinique, la thiamine et l'acide pantothénique. Tout ceci laisse penser que, puisque les vitamines peuvent être aussi bien synthétisées que dégradées par les micro-organismes du sol, la teneur en vitamines résultant est fonction d'un équilibre dynamique. C'est cette notion qui est mise en évidence dans les travaux de STARKEY et SCHMIDT (1942 à 1951). Par les techniques de dosage microbiologique des vitamines, STARREY, en 1942, montre qu'après maturation des composts, il y a une perte importante de riboflavine et d'acide pantothénique, plus élevée même que celle de la matière organique totale : à la fin, la teneur finale du compost est inférieure à celle des produits végétaux bruts entrant dans sa constitution. En 1944, il étudie l'évolution de la teneur en vitamines durant le compostage soit en aérobiose, soit en anaérobiose et observe une évolution générale : au début, il y a une augmentation importante du taux de vitamines coïncidant avec une abondante prolifération initiale des micro-organismes, puis, au fur et à mesure de la décomposition des matières organiques, la teneur baisse. La perte finale est d'autant plus impor-

tante que les constituants du compost sont plus riches au départ. En conclusion, les composts en fin de maturation ont une teneur en vitamines indépendante de leur teneur initiale. Les phénomènes varient dans le même sens en aérobiose ou en anaérobiose, mais sont plus accentués en aérobiose comme l'indique la figure 1.

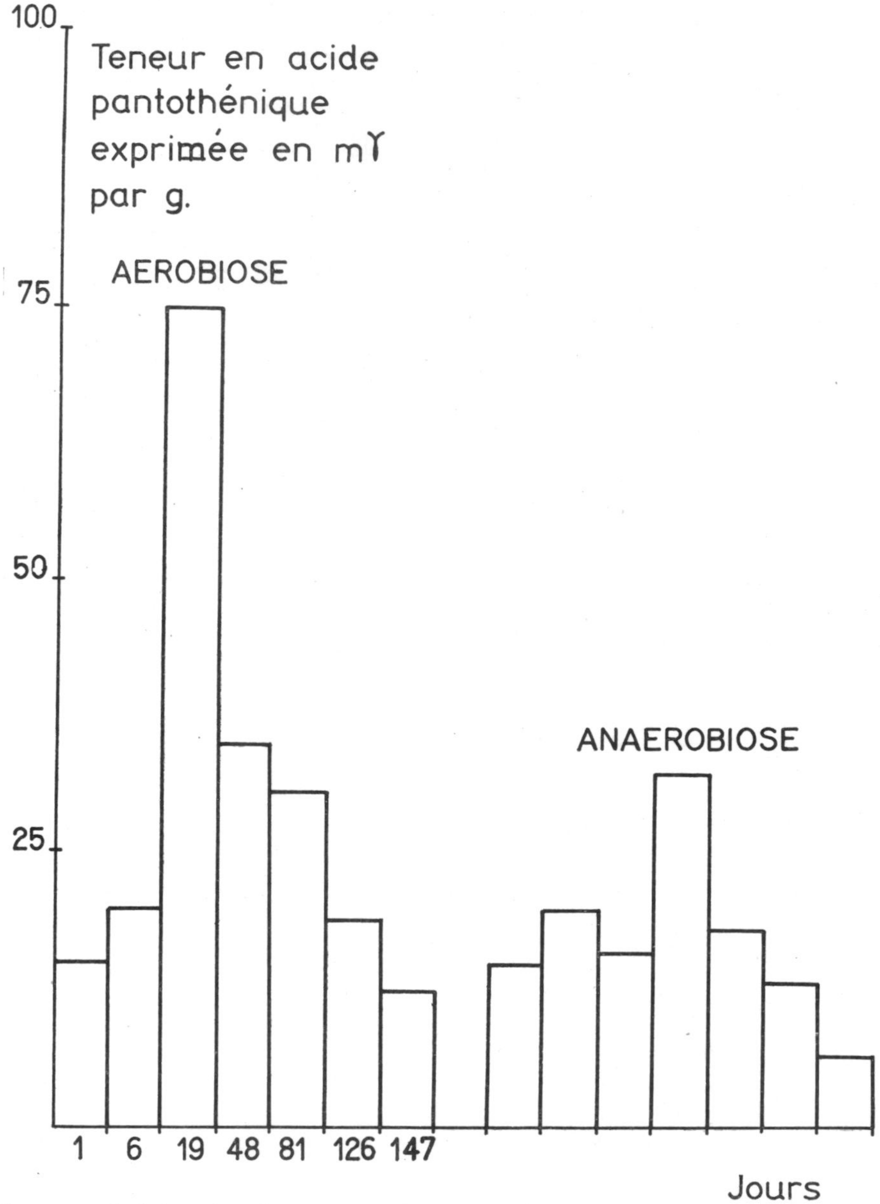


FIG. 1. — Variations dans la teneur en acide pantothénique durant la fermentation d'un compost à base d'herbe (en aérobiose et en anaérobiose) d'après STARKEY (R. L.) ; *Soil Science*, 57, 248, (1944).

d) *Dynamique des vitamines dans le sol.*

L'apport de vitamines dans le sol provient de sources différentes, et la quantité trouvée dépend non seulement de celles existant dans les matières végétales ou animales qui s'y métabolisent, synthétisées par les Bactéries ou

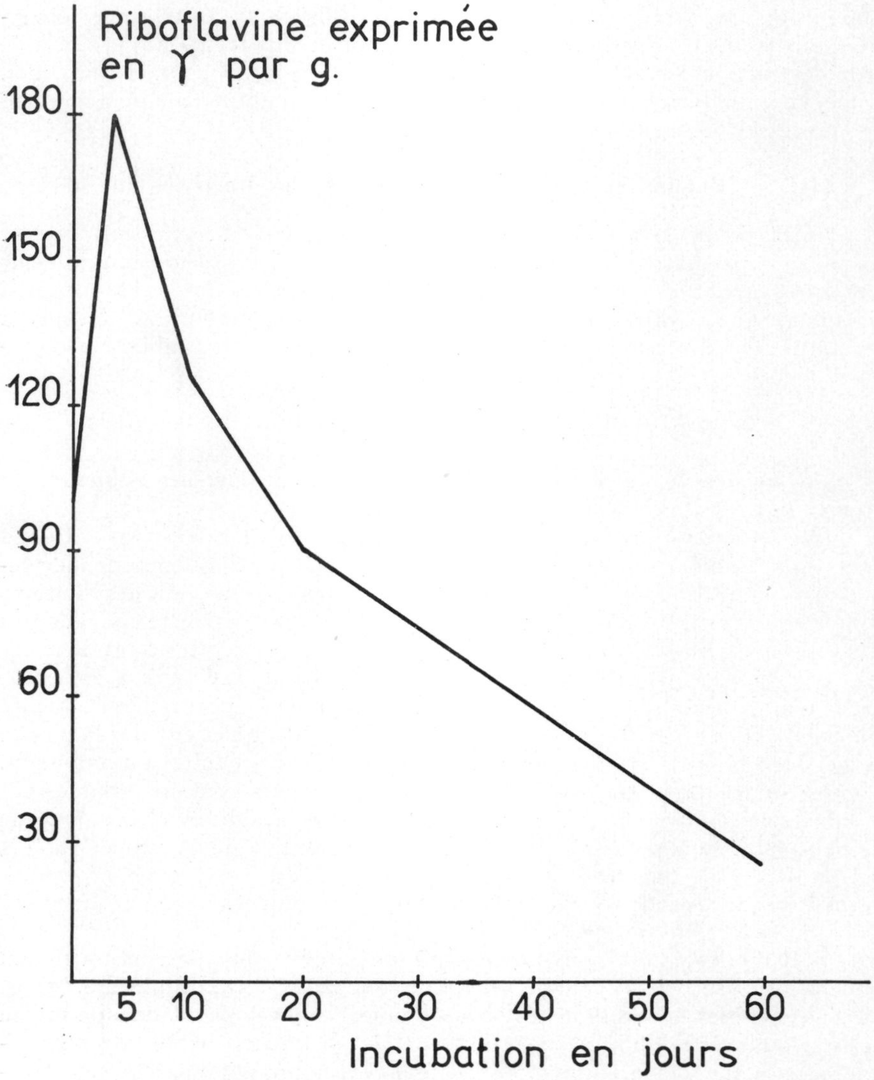


FIG. 2. — Variation de la teneur en riboflavine dans un mélange sol-herbe, d'après SCHMIDT (E. L.) et STARKEY (R. L.) ; *Soil Science*, *71*, 221 (1951).

excrétées par les racines, mais aussi du fait que ces vitamines peuvent être détruites par les micro-organismes. Il n'est pas possible d'évaluer séparément leur synthèse et leur destruction, selon LOCHHEAD (1958), et les valeurs trouvées les méthodes microbiologiques représentent un équilibre dynamique. C'est ce qui est mis en évidence dans un travail de SCHMIDT et STARKEY étudiant en 1951 les variations de la teneur en riboflavine et en

acide pantothénique dans des sols où ils incorporent soit des vitamines pures, soit des végétaux. Les vitamines pures sont rapidement décomposées, sauf si le sol est stérilisé, ce qui prouve le rôle des micro-organismes du sol. Après enfouissement de végétaux (herbe ou paille d'Avoine), il y a une évolution semblable à celle observée dans les composts : augmentation de la teneur, puis diminution après trois jours comme l'indique la figure 2. Ces travaux démontrent que les micro-organismes du sol jouent un rôle important dans la synthèse et la destruction des vitamines et permettent de conclure que la concentration d'une vitamine à un moment donné dépend de l'équilibre dynamique entre les processus de synthèse et de dégradation.

III. — Besoins en vitamines du groupe B des Bactéries du sol

Etant donné la présence constante des vitamines du groupe B dans le sol, il n'est pas extraordinaire d'y trouver des Bactéries les nécessitant pour leur croissance. Il est cependant indispensable d'employer une technique aussi rigoureuse que possible, après avoir isolé les Bactéries du sol dans un milieu de culture pas du tout sélectif, afin d'avoir une image comparable à ce qui se passe réellement dans le sol.

1. Technique employée.

a) *Isolement et dénombrement des Bactéries nécessitant des vitamines du groupe B.*

Elle est décrite avec détail dans le travail de base de LOCHHEAD et CHASE (1943) qui étudient les besoins nutritionnels de la microflore bactérienne prédominante du sol. L'isolement des souches se fait en ensemençant des dilutions convenables de terre dans un milieu gélosé à l'extrait de terre qui, d'après LOCHHEAD et BURTON (1956), est le moins sélectif. STEVENSON et ROUATT (1953) signalent qu'après une incubation assez longue, 14 jours à 26°-28°C, les dénombrements sont plus élevés que dans des milieux plus riches et que les colonies sont plus petites avec peu de tendance à s'étendre et envahir la plaque de gélose, les actions antagonistes et associatives étant réduites au minimum. Toutes les colonies possibles sont prélevées (plusieurs centaines par essai), repiquées dans un milieu semi-solide à l'extrait de terre additionné de 0,02 p 100 de phosphate monopotassique, de 0,01 p. 100 d'extrait de levure et de 0,3 p. 100 de gélose, puis testées ensuite dans 7 milieux de complexité croissante, permettant de répartir les Bactéries isolées en 7 groupes.

b) *Groupes nutritionnels.*

1. Bactéries à fort pouvoir de synthèse se développant dans un milieu minéral de base (NO_3K comme seule source d'azote) avec du glucose.

2. Bactéries nécessitant des acides aminés se développant dans le milieu de base additionné d'un mélange de 10 acides aminés (cystéine, alanine, proline, asparagine, acide glutamique, acide aspartique, arginine, leucine, glycocolle et lysine).

3. Bactéries nécessitant des facteurs de croissance se développant dans le milieu de base additionné d'un mélange de facteurs de croissance (thiamine, biotine, pyridoxine, acide pantothénique, acide nicotinique, riboflavine et inositol) et de cystéine.

4. Bactéries nécessitant des acides aminés et des facteurs de croissance se développant dans le milieu de base additionné des mélanges d'acides aminés et de facteurs de croissance.

5. Bactéries nécessitant les facteurs inconnus contenus dans l'extrait de levure se développant dans le milieu de base additionné de 0,1 p. 100 d'extrait de levure Difco.

6. Bactéries nécessitant les facteurs inconnus contenus dans l'extrait de terre se développant dans le milieu de base additionné d'extrait de terre.

7. Bactéries nécessitant des facteurs inconnus contenus à la fois dans l'extrait de terre et dans l'extrait de levure se développant dans le milieu de base additionné d'extrait de terre et d'extrait de levure.

Ces auteurs déterminent les pourcentages des Bactéries appartenant à ces divers groupes ; par exemple, 19 p. 100 des Bactéries nécessitent de l'extrait de terre pour leur croissance, les facteurs responsables étant présents dans l'extrait acétonique, absorbés par le charbon et libérés par élution. Les relations entre les besoins nutritifs et les types morphologiques n'apparaissent pas nettement, mais ils peuvent dégager certaines tendances : les micro-organismes à fort pouvoir de synthèse sont composés d'une grande quantité de bâtonnets sporulés et de bâtonnets à Gram négatif, les formes pléomorphes proches des *Corynebacteriaceae* comprennent une grande quantité d'organismes ayant des besoins complexes.

2. Bactéries nécessitant de la vitamine B_{12}.

Les premiers travaux consacrés aux Bactéries du sol nécessitant une vitamine du groupe B sont ceux de Lochhead et Thexton (1951 et 1952) : sur 534 souches isolées d'un sol, 41, soit 7,6 p. 100 nécessitent de la vitamine B_{12} ; aucune d'elles ne peut se développer en présence seulement d'extrait de levure, mais toutes ont une croissance normale si l'on ajoute de l'extrait de terre, 2 mγ par ml de cyanocobalamine, ou un filtrat de culture de certaines Bactéries du sol ayant des besoins simples et synthétisant de la vitamine B_{12} décelée par dosage microbiologique. En 1955, Lochhead et Burton étudient les caractères morphologiques et physiologiques des Bactéries nécessitant de la vitamine B_{12} qui sont classés en dix types. En plus de la vitamine B_{12}, tous les dix nécessitent de la thiamine, huit sur dix, de la biotine. Trois d'entre eux sont des coques, un type est composé de formes filamenteuses, non ramifiées, pléomorphes, donnant des coques dans les vieilles cultures. Les six types restant, représentant 80 p. 100 des souches isolées étudiées, ont les caractères des *Corynebacteriaceae* du sol qui sont très pléomorphes, depuis les bâtonnets diphtéroïdes dans les cultures jeunes jusqu'aux formes coccoïdes dans les vieilles cultures : ils représentent des espèces du genre *Arthrobacter* que Conn et Dimmick (1947) ont différencié du genre *Corynebacterium*. La thiamine ou la méthionine, avec ou sans bases puriques et pyrimidiques, ne peuvent remplacer la vitamine B_{12}. Plus tard, Ford et Hutner (1957), étudiant la nature du besoin en vitamine B_{12} de 19 souches isolées par Lochhead et Thexton (1952), trouvent qu'une seule utilise les Facteurs A ou B ou la pseudovitamine B_{12}, tandis que Goldberg, Hutner et Ford (1957), montrent que dans le cas d'une souche la réponse est limitée à la cyanocobalamine et à la vitamine B_{12} III. On désigne sous le nom de Facteur B le noyau porphyrique contenant l'atome de cobalt ; dans les vitamines B_{12} typiques (cyanocobalamine et vitamine B_{12} III), le nucléotide contient une base dérivée du benziminazole (5,6 diméthylbenziminazole ou 5 hydroxybenziminazole) ; dans la pseudovitamine B_{12} et dans le facteur A, le nucléotide contient une base purique (adénine ou 2-méthyladénine).

Ces résultats indiquent que le sol est un habitat important de Bactéries nécessitant de la vitamine B_{12} (environ 4 millions par g de sol), alors que cette propriété était habituellement réservée aux *Lactobacillus*, et que ces diverses souches ont des besoins étroitement spécifiques.

3. **Bactéries nécessitant le « Terregens factor ».**

Ce furent LOCHHEAD et BURTON qui, en 1953, isolèrent un micro-organisme du sol, *Arthrobacter terregens*, nécessitant un facteur inconnu présent dans l'extrait de terre. Le fait que d'autres Bactéries du sol, comme *Arthrobacter pascens*, synthétisent ce facteur montre l'étroite dépendance des Bactéries du sol entre elles pour leurs besoins nutritionnels. CHAPLIN, en 1957, étudie en détail le cycle morphologique des deux espèces d'*Arthrobacter* précitées : ce sont des bâtonnets diphtéroïdes, à Gram variable, devenant des coques dans les cultures plus âgées ; certaines cellules forment ensuite des cystes qui germent et libèrent des cellules isolées. BURTON en 1957 groupe les diverses Bactéries nécessitant le Terregens factor en quatre types selon leurs caractères physiologiques et leurs besoins nutritionnels. Du point de vue besoin en Terregens factor, ces Bactéries peuvent croître en présence de diverses substances contenant du fer, comme le coprogène décrit par HESSELTINE et ses collaborateurs (1957) ou le ferrichrome de NEILANDS (1952), tandis que l'hématine et l'acide aspergillique n'ont qu'une faible activité. Coprogène, ferrichrome et Terregens factor sont trois substances différentes d'après NEILANDS (1957), mais qui joueraient le rôle de coenzymes ou de précurseurs dans les transports de fer dans le métabolisme de ces Bactéries. En plus du T F, elles nécessitent de la thiamine, de la biotine, quelquefois de l'acide *p*-aminobenzoïque partiellement remplacé par de l'acide folique. LOCHHEAD et BURTON (1953) ont montré qu'*Arthrobacter terregens* ne pouvait croître qu'en présence d'acide pantothénique. Toutes ces raisons conduisent à lier l'étude du T F (Terregens factor) à celle des vitamines du groupe B. LOCHHEAD et BURTON (1956) remarquent qu'il y a environ 100 à 500.000 Bactéries nécessitant le T F par g de sol, soit à peu près dix fois moins que de Bactéries nécessitant de la vitamine B_{12} ; l'expérience ayant porté sur 2 877 souches isolées paraît concluante.

4. **Besoins spécifiques de la microflore bactérienne prédominante du sol.**

LOCHHEAD et CHASE en 1943, WEST et LOCHHEAD en 1940, avaient observé que, parmi les Bactéries du sol, de nombreuses souches nécessitaient une ou plusieurs vitamines préformées. En 1957, LOCHHEAD et BURTON examinent les besoins spécifiques de 499 Bactéries isolées d'un sol. Ils emploient la technique décrite précédemment et repiquent chaque souche isolée dans des milieux liquides constitués d'un milieu de base additionné d'une ou plusieurs vitamines. Une vitamine est considérée comme essentielle lorsqu'il n'y a aucune croissance en son absence. Ils trouvent qu'une proportion importante des Bactéries isolées (27,1 p. 100 correspondant à 14,1 millions par g) nécessite une ou plusieurs vitamines qui sont rangées d'après leur ordre de fréquence dans le tableau III.

Le fait que la thiamine soit la vitamine la plus nécessitée est en corrélation avec sa présence fréquente dans le sol en quantité relativement importante, puis vient la biotine et en troisième position la vitamine B_{12}. Dans la plupart des cas, la pyridoxine, l'acide *p*-aminobenzoïque, la choline et l'inositol ne sont pas des facteurs de croissance proprement dits, car ils ne font que la stimuler, sauf pour un petit nombre de Bactéries inférieur à 100 000 par g. La majorité des souches (64 p. 100) exige plus d'une vitamine ; seulement dans le cas de la thiamine, de la biotine et de la riboflavine, on trouve des souches nécessitant un seul de ces facteurs. En tout, il y a seize modes de besoin en vitamines. En général, une ou deux vitamines sont nécessaires, quelquefois trois, mais dans quelques cas, quatre et même cinq vitamines doivent être fournies.

TABLEAU III

Présence des Bactéries nécessitant des vitamines dans un sol cultivé.

Vitamine nécessitée (soit seule ou en combinaison avec d'autres)	Bactéries nécessitant des vitamines	
	En % du nombre total de Bactéries isolées	En millions par g de terre
Thiamine	19,4	10,2
Biotine	16,4	8,6
Vitamine B_{12}	7,2	3,8
Acide pantothénique	4,6	2,4
Acide folique	3,0	1,6
Acide nicotinique	2,0	1,1
Riboflavine	0,6	0,3
Pyridoxine	0,2	0,1
Acide p. aminobenzoïque	0,2	0,1
Choline	0,2	0,1
Inositol	0,2	0,1

5. **Effet rhizosphère sur les Bactéries nécessitant des vitamines du groupe B.**

En employant les techniques de LOCHHEAD et CHASE (1943), LOCHHEAD et THEXTON (1947), WALLACE et LOCHHEAD (1949) montrent qu'un effet rhizosphère constant est une diminution du pourcentage des Bactéries nécessitant des vitamines du groupe B. Mais, en 1956, LOCHHEAD et BURTON étudient 2 877 souches bactériennes provenant de la rhizosphère du Blé, de l'Orge et du Soja ou des sols témoin correspondant ; dans ceux-ci les Bactéries nécessitant de la vitamine B_{12} représentent 6,4 p. 100-7,8 p. 100 et 7 p. 100 de la population totale, soit 4,3-4,1 et 3,9 millions par g de sol, alors que, dans la rhizosphère de ces trois plantes, les pourcentages respectifs ne sont plus que de 3,7 p. 100-2,7 p. 100 et 3,8 p. 100, montrant une réduction notable. Avec le T F (Terregens factor) le phénomène est identique. Mais dans les deux cas, comme il y a une augmentation considérable du nombre total des Bactéries dans la rhizosphère, le nombre absolu de celles qui nécessitent de la vitamine B_{12} ou du T F est plus élevé dans la rhizosphère de ces diverses plantes que dans le sol témoin. En fait, l'effet rhizosphère sur les Bactéries nécessitant des vitamines du groupe B est très complexe : suivant LOCHHEAD (1957), il y a toujours une stimulation préférentielle des Bactéries à fort pouvoir de synthèse se développant dans un milieu minéral de base additionné de glucose, et les filtrats de culture de certaines de ces Bactéries inhibent celles qui nécessitent des vitamines du

groupe B ; au contraire, dans la rhizosphère de l'Orge et du Seigle, d'autres Bactéries à fort pouvoir de synthèse produisent cinq vitamines (thiamine, biotine, vitamine B_{12}, riboflavine et T F) que l'on peut déceler dans leur milieu de culture par des méthodes microbiologiques. C'est la résultante de ces deux actions qui modifie le pourcentage et le nombre des Bactéries nécessitant des vitamines du groupe B que l'on trouve dans la rhizosphère. L'augmentation du nombre de ces Bactéries n'est donc pas due à une action directe de la plante qui ne semble pas excréter ces vitamines, mais plutôt à une augmentation du nombre des Bactéries capables de les synthétiser, car elles sont normalement stimulées préférentiellement dans la rhizosphère. Par contre, LOCHHEAD (1957) observe que les teneurs respectives en vitamine B_{12} et en T F des sols témoins et des rhizosphères ne montrent pas de différences significatives. Il est possible de penser qu'une synthèse abondante de vitamines dans la rhizosphère est masquée par une destruction importante conduisant à un équilibre correspondant à la teneur initiale du sol.

IV. — Conclusions

Les vitamines du groupe B et les Bactéries qui les nécessitent ou qui les synthétisent ont été beaucoup moins étudiées que tout ce qui a trait aux substances antibiotiques, mais ces facteurs de croissance peuvent être rangés dans la même catégorie que les antibiotiques en ce sens qu'ils agissent sur la croissance de nombreuses Bactéries à de faibles concentrations et qu'ils peuvent être produits par synthèse microbienne. On pense que l'action des vitamines peut être aussi importante que l'activité antibiotique pour agir sur l'équilibre microbien : en effet, si le pourcentage des Bactéries nécessitant des vitamines était insignifiant, leur présence pourrait ne pas présenter d'intérêt ; mais par suite de l'importance de leur nombre, il est vraisemblable de penser qu'elles jouent un rôle dans le sol. En particulier dans les problèmes complexes relevant des rapports entre la microflore normale, les micro-organismes pathogènes et les plantes elles-mêmes. Il est possible que les échecs signalés par GARRETT (1955) dans l'emploi des micro-organismes producteurs d'antibiotiques pour limiter les maladies dues aux micro-organismes pathogènes des plantes soient liés au fait d'avoir négligé l'étude des facteurs qui stimulent et non qui suppriment la croissance des micro-organismes du sol. Les résultats acquis actuellement montrent que le sol est un habitat important de Bactéries nécessitant des vitamines et que leur grande interdépendance avec celles qui les synthétisent, ou qui les détruisent, conduit à un équilibre microbien dont les conséquences mériteraient une étude approfondie. S'il s'agit d'un sol cultivé, il est alors encore plus difficile de séparer le rôle des divers facteurs qui interviennent dans la rhizosphère : catabolisme des résidus animaux et végétaux, excrétion des racines, synthèse ou destruction par les micro-organismes.

RÉSUMÉ

De nombreux auteurs ont mis en évidence la présence de vitamines dans la plupart des sols. Ces vitamines proviennent de sources différentes et la quantité trouvée dépend non seulement de celles existant dans les matières animales ou végétales qui s'y métabolisent, synthétisées par les Bactéries, ou excrétées par les racines, mais aussi du fait que les vitamines peuvent être détruites par les micro-organismes du sol. L'étude aboutit à la conclusion que la concentration d'une vitamine dans le sol, à un moment donné, est due

à l'équilibre dynamique entre les processus de synthèse et de dégradation. Quand on isole les Bactéries du sol dans un milieu aussi peu sélectif que possible (gélose à l'extrait de terre), on trouve qu'il y a un pourcentage assez important de Bactéries nécessitant des vitamines du groupe B pour leur croissance optimum : le fait que la thiamine soit la vitamine la plus nécessitée est en corrélation avec sa présence fréquente dans le sol, puis viennent la biotine et la vitamine B12. Dans la rhizosphère des diverses plantes étudiées, il y a une double action : augmentation du pourcentage des Bactéries à fort pouvoir de synthèse vitaminique favorisant la croissance des Bactéries nécessitant des vitamines du groupe B, action inhibitrice de certains de leurs filtrats de culture sur ces mêmes Bactéries. La résultante de ces interactions complexes est une augmentation du nombre des Bactéries nécessitant des vitamines du groupe B dans la rhizosphère des plantes, mais il y a toujours une diminution de leur pourcentage par rapport au sol témoin.

SUMMARY

The requirements of soil bacteria for vitamins of the B group.

Several authors produced evidence of the presence of vitamins in most of the soils. These vitamins originate from various sources, and their amounts depend not only on those present in animal and vegetal matter, synthesised by bacteria or excreted by roots, but also on their microbial destruction in the soil. The vitamin concentration in soil at a given time appears to be due to a dynamic equilibrium between the processes of synthesis and degradation. The isolation of soil bacteria in an unselective medium shows a high percentage of bacteria which require vitamins of the B group for optimum growth; thiamine is the vitamin most required and also occurs most frequently in the soil, followed by biotine and vitamin B12. The rhizosphere of various plants studied shows a twofold action : an increase in the percentage of bacteria possessing a high capacity of synthesising vitamins that promote the growth of bacteria which require vitamins of the B group, and inhibition of the same bacteria by some of their culture filtrates. The result of these complex interactions is an increase in the number of bacteria which require vitamins of the B group in the rhizosphere of plants, although there is always a decrease in their proportions as compared with the control soil.

ZUSAMMENFASSUNG

Bedürfnisse der Bodenbakterien an Vitaminen der B-Gruppe.

Zahlreiche Autoren stellten in der Mehrzahl der Böden die Anwesenheit von Vitaminen fest. Diese Vitaminen entspringen verschiedener Quellen und die gefundene Menge hängt nicht allein von denselben welche in tierischen oder pflanzlichen Material metabolisiert (aufgebaut), durch Bakterien synthetisiert oder durch Wurzeln ausgeschieden werden, jedoch auch von der Tatsache, dass die Vitamine durch die Mikroorganismen des Bodens zerstört werden können. Der Autor kommt zu der Schlussfolgerung dass die Konzentration einer Bodenvitamine an einem gegebenen Zeitpunkt, durch das dynamische Gleichgewicht zwischen Synthese und Abbauprozessen bedingt wird. Wenn man Bakterien

des Bodens in einem so wenig wie möglich selektivem Medium (Agar-Agar Bodenextrakt) isoliert, so findet man einen ansehnlichen Prozentsatz von Bakterien welche für ihr optimales Wachstum, Vitamine der B-Gruppe benötigen; die Tatsache dass Thiamin das am meisten benötigte Vitamin darstellt steht in der Wechselbeziehung ihrer häufigen Anwesenheit im Boden, sodann kommt das Biotin und das Vitamin B12.

In der Rhizosphäre der verschiedenen untersuchten Pflanzen liegt eine doppelte Wirkung vor : Zunahme des Prozentsatzes an Bakterien mit starkem Vitaminsynthesevermögen welche das Wachstum solcher Bakterien begünstigt, die Vitamine der B-Gruppe benötigen, sowie eine Inhibitionswirkung von gewissen ihr entstammenden Kulturfiltrate auf dieselben Bakterien. Die Resultante dieser komplexen Interaktionen besteht in einer Zunahme der Bakterienanzahl welche in der Rhizosphäre der Pflanzen Vitamine der B-Gruppe benötigen, aber es besteht immer eine Verminderung ihres Prozentsatzes gegenüber dem Bezugsboden.

Потребность почвенных бактерий в витаминах группы В.

Ж. РИВЬЕР. Национальный Агрономический Институт. Париж.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Присутствие витаминов в большинстве почв установлено многими авторами. Эти витамины получаются из многих источников, и найденное количество зависит не только от количеств находящихся в материалах животного или растительного происхождения, которые в почвах подвергаются превращениям, не только от количеств синтетизированных бактериями или выделенных корнями, но также и от факта, что витамины могут быть уничтожены почвенными микроорганизмами. Автор приходит к заключению, что концентрация некоторого витамина в почве, в данный момент, зависит от динамического равновесия между процессами синтеза и процессами разложения. Когда изолируют почвенные бактерии в среде как можно менее селективной (желоза на почвенном экстракте), то находят, что имеется довольно значительный процент бактерий, нуждающихся, для оптимального развития, в витаминах группы В : факт, что тиамин (la thiamine) является наиболее необходимым находится в зависимости от его частого присутствия в почве; затем следует биотин (la biotine) и витамин В 12. В ризосфере различных изученных растений существует двойное действие : увеличение процента бактерий, имеющих сильную способность витаминного синтеза, который благоприятствует развитию бактерий нуждающихся в витаминах группы В, и действие препятствующее (action inhibitrice) их некоторых фильтратов культуры на этих самих бактерий. Результирующая этих сложных взаимодействий — увеличение числа бактерий нуждающихся в витаминах группы В в ризосфере растений; но всегда происходит уменьшение их процентного содержания по сравнению с почвой без растений (sol témoin).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BURTON (M. O.). — Characteristics of bacteria requiring the terregens factor. *Can. J. Microbiol*, **3**, 107, 1957.

BURTON (M. O.) et LOCHHEAD (A. G.). — Nutritional requirements of *Arthrobacter terregens*. *Can. J. Botany*, **31**, 145, 1955.

BURTON (M. O.), SOWDEN (F. J.) et LOCHHEAD (A. G.). — Studies on the isolation and nature of the terregens factor. *Can. J. Biochem. Physiol.*, **32**, 400, 1954.

CARPENTER (C. C.). — Riboflavin-vitamin B_{12} in soil. *Science*, **98**, 109, 1943.

CHAPLIN (C. E.). — Life cycles in *Arthrobacter pascens* and *Arthrobacter terregens*. *Can. J. Microbiol.*, **3**, 103, 1957.

CONN (H. J.) et DIMMICK (I.). — Soil bacteria similar in morphology to *Mycobacterium* and *Corynebacterium*. *J. Bacteriol.*, **54**, 291, 1947.

DARKEN (M. A.). — Production of vitamin B_{12} by micro organisms and its occurence in plant tissue. *Bot. Rev.*, **19**, 99, 1953.

FORD (J. E.) et HUTNER (S. H.). — On the nature of the vitamin B_{12} requirements in soil bacteria isolated by Lochhead and his co-workers. *Can. J. Microbiol.*, **3**, 319, 1957.

FOSTER (J. W.). — Microbiological aspects of riboflavin. I. Introduction. II. Bacterial oxidation of riboflavin to lumichrome. *J. Bacteriol.*, **47**, 27, 1943.

GARRETT (S. D.). — A century of root-disease investigation. *Ann. Appl. Biol.*, **42**, 211, 1955.

GOLDBERG (M. K.), HUTNER (S. H.) et FORD (J. E.). — Nutrition of a cobalamin-requiring soil bacterium. *Can. J. Microbiol.*, **3**, 329, 1957.

HESSELTINE (C. W.), PIDACKS (C.), WHITE HILL (A. R.), BOHONOS (N.), HUTCHINGS (B. L.) et WILLINS (J. H.). — Coprogen, a new growth factor for coprophilic fungi. *J. Am. Chem. Soc.*, **74**, 1362, 1952.

LILLY (V. G.) et LEONIAN (L. H.). — Vitamin B_1 in soil. *Science*, **89**, 292, 1952.

LOCHHEAD (A. G.). Qualitative studies of soil micro organisms. XV. Capability of the predominant bacterial flora for synthesis of various growth factors. *Soil Sci.*, **84**, 395, 1957.

LOCHHEAD (A. G.). — Soil bacteria and growth-promoting substances. *Bacteriol. Revs.*, **22**, 3, 1958.

LOCHHEAD (A. G.) et BURTON (M. O.). — An essential bacterial growth factor produced by microbial synthesis. *Can. J. Botany*, **31**, 7, 1953.

LOCHHEAD (A. G.) et BURTON (M. O.). — A bacterial growth factor produced by a soil organism. *Atti VI. Congr. Intern. Microbiol. Roma*, **1**, 298, 1953.

LOCHHEAD (A. G.) et BURTON (M. O.). — Qualitative studies of soil microorganisms. XII. Characteristics of vitamin B_{12} requiring bacteria. *Can. J. Microbiol.*, **1**, 319, 1955.

LOCHHEAD (A. G.) et BURTON (M. O.). — Incidence in soil of bacteria requiring vitamin B_{12} and the terregens factor. *Soil Sci.*, **82**, 237, 1956.

LOCHHEAD (A. G.) et BURTON (M. O.). — Importance of soil extract in the enumeration and study of soil bacteria. *Trans. Intern. Congr. Soil Sci. 6 th Congr. Paris*, C, 157, 1956.

LOCHHEAD (A. G.) et BURTON (M. O.). — Soil as a habitat of vitamin-requiring bacteria. *Nature*, **178**, 144, 1956.

LOCHHEAD (A. G.) et BURTON (M. O.). — Qualitative studies of soil microorganisms. XIV. Specific vitamin requirements of the predominant bacterial flora. *Can. J. Microbiol.*, **3**, 35, 1957.

LOCHHEAD (A. G.) et CHASE (F. E.). — Bacterial growth factors in soil. *Science*, **96**, 387, 1942.

LOCHHEAD (A. G.) et CHASE (F. E.). — Qualitative studies of soil microorganisms. V. Nutritional requirements of the predominant bacterial flora. *Soil Sci.*, **55**, 185, 1943.

LOCHHEAD (A. G.) et THEXTON (R. H.). — Qualitative studies of soil microorganisms. VII. The rhizosphere effect in relation to the amino-acid nutrition of bacteria. *Can. J. Research*, C, **25**, 20, 1947.

LOCHHEAD (A. G.) et THEXTON (R. H.). — Vitamin B_{12} as a growth factor for soil bacteria. *Nature*, **167**, 1034, 1951.

LOCHHEAD (A. G.) et THEXTON (R. H.). — Qualitative studies of soil microor-

ganisms. X. Bacteria requiring vitamin B_{12} as growth factor. *J. Bacteriol*, **63**, 219, 1952.

Lwoff (A.) et Lederer (E.). — Remarques sur l'extrait de terre envisagé comme facteur de croissance pour les Flagellés. *C. R. Soc. Biol.*, **119**, 971, 1935.

Meshkov (V. N.). — Facteurs de croissance pour les micro-organismes dans les sécrétions radicellaires des plantes (en russe). *Zhur. Obscher. Biol.*, **13**, 76, 1952.

Metz (H.). — Recherches sur la rhizosphère (en allemand). *Arch. Mikrobiol.*, **23**, 297, 1955.

Metzger (W. I.). — Microbic decomposition of pantothenic acid. *J. Bacteriol.*, **54**, 135, 1947.

Mirick (G. S.). — The oxidation of p. aminobenzoic acid and anthranilic acid by specifically adapted enzymes of a soil bacillus. *J. Exp. Med.*, **78**, 255, 1943.

Neilands (J. B.). — A crystalline organo-iron pigment from a smut fungus (*Ustilago sphaerogena*). *J. Am. Chem. Soc.*, **74**, 4846, 1952.

Pringsheim (E. G.). — Wuchsstoffe im Erdboden? *Naturwissens.* **12**, 197, 1935.

Rivière (J.). — Contribution à l'étude de la rhizosphère du Blé. *Thèse Sciences* Paris, 1959.

Roulet (M. A.). — Recherches sur les vitamines du sol. *Experientia*, **4**, 149, 1958.

Roulet (M. A.) et Schopper (W. H.). — Les vitamines du sol et leur signification. *Trans. Intern. Congr. Soil Sci., 4 th Congr. Amsterdam*, **1**, 202, 1950.

Sanborn (J. R.). — Essential food substances in soil. *J. Bacteriol.*, **13**, 113, 1927.

Schmidt (E. L.). — Soil microorganisms and plant growth substances. I. Historical. *Soil Sci.*, **71**, 129, 1951.

Schmidt (E. L.) et Starkey (R. L.). — Soil micro organisms and plant growth substances. II. Transformations of certain B vitamins in soil. *Soil Sci.*, **71**, 221, 1951.

Schopfer (W. H.). — Plants and Vitamins. Chronica Co., Waltham, Massachusets, 1943.

Starkey (R. L.). — Transformation of riboflavin and pantothenic acid during decomposition of plant materials. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **7**, 237, 1942.

Starkey (R. L.). — Changes in the content of certain B vitamins in organic materials decomposing under aerobic and anaerobic conditions. *Soil Sci.*, **47**, 27, 1944.

Stevenson (I. L.) et Rouatt (J. W.). — Qualitative studies of soil microorganisms. XI. Further observations on the nutritional classification of bacteria. *Can. J. Botany*, **31**, 438, 1953.

Wallace (A. H.) et Lochhead (A. G.). — Qualitative studies of soil micro organisms. VIII. Influence of various crop plants on the nutritional groups of soil bacteria. *Soil Sci.*, **67**, 63, 1949.

West (P. M.). — Excretion of thiamine and biotine by the roots of higher plants. *Nature*, **144**, 1050, 1939.

West (P. M.) et Lochhead (A. G.). — Qualitative studies of soil microorganisms. IV. The rhizosphere in relation to the nutritive requirements of soil bacteria. *Can. J. Research*, C, **18**, 129, 1940.

Williams (R. P.) et Koser (S. A.). — Bacterial destruction of thiamine. *J. Infect. Diseases*, **81**, 130, 1947.

631. 416. 4 : 631, 423. 3 : 546. 32.

NOTES ANALYTIQUES

SUR L'APPRÉCIATION DU NIVEAU DES RÉSERVES POTASSIQUES DES SOLS ; POSSIBILITÉ D'UTILISATION D'UN TEST MORGAN-BARBIER AMÉLIORÉ

PAR

R. BLANCHET et S. PÉRIGAUD [1]

Station Agronomique, Châteauroux.

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

Indices Morgan-Barbier, potassium échangeable et pouvoir adsorbant des sols.

Fidélité du test Morgan-Barbier.

Essai de remplacement de l'acétate de sodium par l'acétate d'ammonium dans le réactif Morgan-Barbier.

Relations avec l'alimentation potassique des plantes.

Conclusions.

Introduction.

Nous avons montré antérieurement que l'intensité de la réaction des cultures aux engrais potassiques est surtout liée à la proportion d'ions K^+ parmi les cations échangeables du sol, c'est-à-dire au degré de saturation du complexe adsorbant en ions K^+ (1). Ce degré de saturation peut être apprécié en déterminant les rapports K/T, K/S ou à défaut K/Ca, dans lesquels T et S représentent respectivement la capacité d'échange de cations à pH 7 et la somme des cations métalliques échangeables ; K et Ca sont les teneurs en potassium et en calcium échangeables, toutes ces valeurs étant exprimées en milliéquivalents.

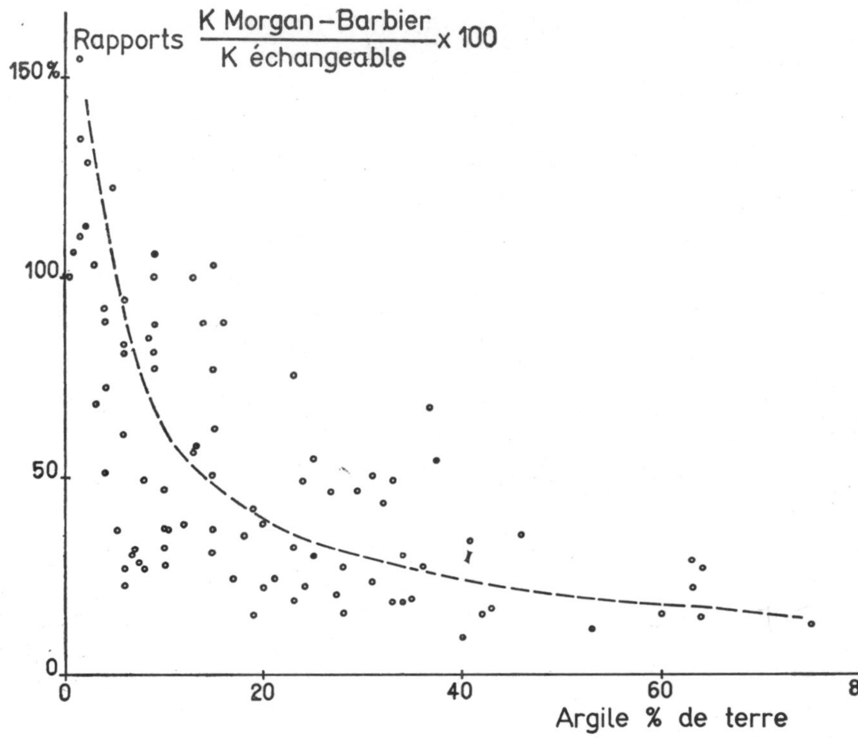
Ces rapports font ainsi intervenir à la fois l'ampleur des réserves potassiques et la capacité d'adsorption du sol. Leur détermination présente l'inconvénient d'être un peu longue.

Très souvent, le niveau des réserves potassiques des sols n'est apprécié que d'après la teneur en K échangeable, en tenant compte de la nature du sol, ou d'après l'indice Morgan-Barbier. L'intensité du pouvoir adsorbant du sol est évidemment sans influence sur le résultat de la mesure de K échangeable, puisqu'il s'agit d'un *épuisement*. Par contre, le pouvoir adsorbant intervient dans le test Morgan-Barbier, qui consiste en une mesure à l'*équilibre* (ou tout

[1] Avec la collaboration technique de C. CHAUMONT.

au moins dans un état voisin de l'équilibre) : plus le pouvoir adsorbant du sol est intense, plus la fraction des ions K^+ déplacée par le réactif est faible. On obtient donc une indication des réserves potassiques *relative* au pouvoir adsorbant du sol.

Nous avons examiné cette relation entre la capacité d'adsorption du sol et la fraction d'ions K^+ échangeables extraite par le réactif Morgan-Barbier, afin de rechercher si, en améliorant le dosage proprement dit, il était possible de réaliser un test valable et plus simple que la détermination des rapports K/S ou K/T. D'autre part, nous avons comparé les résultats de ce test amélioré avec l'alimentation potassique des plantes, dans différentes conditions.



GRAPHIQUE I. — Rapports $\frac{\text{K Morgan-Barbier}}{\text{K échangeable}}$ en fonction des teneurs des sols en argile.

Indices Morgan-Barbier, potassium échangeable et pouvoir adsorbant des sols.

Les déterminations de potassium échangeable et les tests Morgan-Barbier, tels que ceux-ci ont été décrits par BARBIER (2), ont été effectués sur un grand nombre de sols de la région de Châteauroux, appartenant à des types très divers. Sur le graphique I, les rapports $\frac{\text{K extrait Morgan-Barbier}}{\text{K échangeable}}$, dans lesquels les deux données sont exprimées en p. p. m. de sol, sont portés en fonction des teneurs des terres en argile. On constate que, bien que la relation ne soit

pas très étroite, ces rapports sont d'autant plus élevés que les teneurs en argile sont plus faibles, et inversement. Dans les sols sableux, on observe fréquemment des indices Morgan-Barbier plus élevés que les teneurs en K échangeable ; cet excédent de K peut être dû à une légère attaque des minéraux, le réactif étant un peu acide. Dans les sols argileux, au contraire, la fraction de K échangeable déplacée par le réactif n'est que de l'ordre de 20 p. 100.

Bien que la variation ne soit pas linéaire, la corrélation entre la fraction de K échangeable déplacée par le réactif Morgan-Barbier et la teneur des sols en argile est relativement élevée : sur 90 échantillons, le coefficient de corrélation, très significatif, est de — 0,5.

Lorsque le pouvoir adsorbant des sols est dû principalement à la matière organique, condition réalisée dans les sols sableux, l'extraction par le réactif Morgan-Barbier est intense, même si la capacité d'adsorption est assez importante. Les exemples suivants, dans lesquels les rapports K Morgan-Barbier/K échangeable sont élevés, en témoignent :

Argile %	Matière organique %	T m. é. q. par kg	S/T × 100	K échangeable p. p. m. de sol	K Morgan-Barbier p. p. m. de sol	K Morgan-Barbier/K échan. × 100
0,5	2,25	46	93	42	42	100
2,9	2,5	54	100	35	34	97
0,5	1,1	26	90	47	50	106
3	2,86	70	100	25	17	70
3,6	3,4	51	100	65	47	72
6	3,1	54	100	50	30	60
4,3	7,9	106	100	218	200	92

Les mêmes observations apparaissent lorsque l'on considère un profil comprenant à la fois des horizons sableux et argileux :

Profondeur	Argile %	Mat. or. %	T m. é. q. par kg	S/T × 100	K éch. p. p. m. de sol	K Mor. Bar p. p. m. sol	K Mor.Bar. ×100/K éch.
0–15	6,2	2	40	100	21	17	81
15–35	4,1	traces	14	100	9	8	89
35–60	41,7	0,8	143	87	50	17	34

Le réactif Morgan-Barbier extrait donc des quantités de potassium sensiblement égales aux teneurs en K échangeable lorsque les ions K^+ sont retenus par un complexe principalement organique. Au fur et à mesure que le complexe adsorbant devient plus argileux, la fraction d'ions K^+ déplacée diminue fortement.

Ces caractères apparaissent comme une justification de la méthode :

— Il est bien connu que, pour alimenter convenablement les cultures, les terres doivent être d'autant plus riches en K échangeable qu'elles sont plus argileuses (ce qui nécessite une interprétation des teneurs en K échangeable tenant compte de la nature du sol).

— Le potassium lié à la matière organique est particulièrement actif à l'égard de l'alimentation des plantes, et beaucoup plus labile que le potassium lié à l'argile (3,4).

Le principe de la méthode Morgan-Barbier apparaît donc assez satisfaisant, supérieur même au principe de la détermination de K échangeable.

Fidélité du test Morgan-Barbier.

Plusieurs auteurs, en particulier COLLIER et GACHON, ont mis en évidence le manque de reproductibilité de la méthode Morgan-Barbier (5) ; bien qu'il soit moins accusé dans le cas du potassium que dans celui du phosphore, il demeure un inconvénient assez grave, auquel nous nous sommes heurtés également. Ce défaut de fidélité nous paraît dû à deux causes :

— Quoique les équilibres de désorption des ions K^+ soient en général très rapidement atteints (6), on observe entre plusieurs extractions réalisées sur un même échantillon de sol des écarts dépassant parfois le rapport de 1 à 2. Il semble donc que l'équilibre ne soit pas toujours réalisé, et le résultat peut alors dépendre de la vigueur de l'agitation...

— Le dosage du potassium dans l'extrait, par turbidimétrie appréciée à l'œil, est également peu précis et mal reproductible. Le dosage par photométrie de flamme est peu satisfaisant aussi, en raison de l'interférence K-Na : la détermination de K est effectuée dans une solution 500 à 1000 fois plus concentrée en Na.

Essai de remplacement de l'acétate de sodium par l'acétate d'ammonium dans le réactif Barbier-Morgan.

Nous avons été conduits à envisager cette modification tout d'abord pour faciliter le dosage par photométrie de flamme du potassium extrait. Ce dosage ne présente ainsi aucune difficulté. Il est, bien entendu, nécessaire de préparer la gamme-étalon dans le réactif d'extraction, qui renferme par litre :

— acide acétique pur cristallisable : 70 ml ;

— ammoniaque densité 0,92, 22°B : 60 ml.

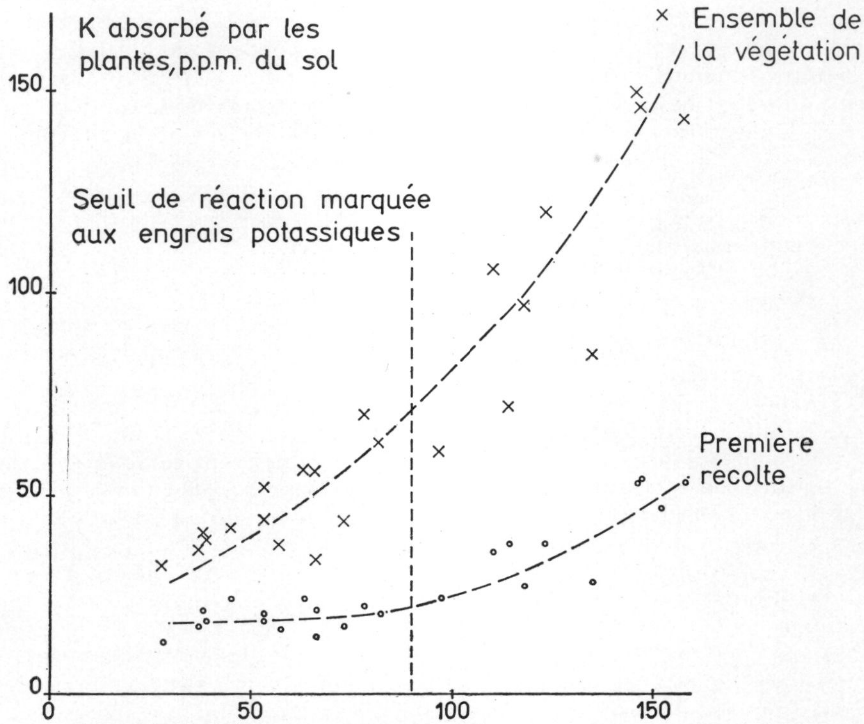
Cette solution est également tamponnée à pH 4,8, l'acétate d'ammonium remplaçant, molécule pour molécule, l'acétate de sodium.

	Argile %	K éch. p.p.m. sol	Morgan Barbier, p.p.m. de sol	
			acétate Na	acétate NH_4
Sols sableux......	2,9	35	40	37
»	6	46	45	38
»	8,5	45	45	39
Sols argileu x.....	31	535	115	320
»	39	470	60	260
»	63	190	50	146

D'autre part, l'équilibre paraît se réaliser plus rapidement, et les extractions sont beaucoup mieux reproductibles ; les concentrations en K de plusieurs extraits successifs des mêmes sols présentent des variations négligeables. Le temps d'agitation de une minute et le rapport sol/solution de 1/2 ont été conservés.

Les ions NH_4 déplaçant plus fortement les ions K^+ que ne le font les ions Na^+, les fractions de potassium extraites par ce réactif modifié sont plus importantes dans les sols argileux ; dans les sols sableux où la solution habituelle à l'acétate de sodium déplace la presque totalité du potassium échangeable, les résultats sont voisins, ainsi que l'indiquent les quelques exemples suivants.

La modification du réactif diminue donc l'amplitude de la variation du rapport K Morgan-Barbier/K échangeable. Sur un grand nombre d'échantillons, ce rapport a varié entre 0,5 (sols argileux) et 1,1 (sols sableux). Ce réactif n'extrait donc dans les sols argileux, que la moitié environ du potassium échangeable. Cette amplitude de variabilité de la fraction extraite reste suffisamment élevée pour que l'on puisse, semble-t-il, s'attacher à l'indice obtenu sans avoir beaucoup à considérer la teneur en argile du sol. Le facteur de « correction » par rapport aux teneurs en K échangeable atteint en effet 0,5 dans les sols argileux, ce qui est assez couramment pratiqué dans les interprétations. Notons que, dans l'emploi du réactif à l'acétate de sodium, BARBIER préconisait une interprétation tenant compte de la teneur en argile, mais en fixant pour les limites de réaction aux engrais des indices plus élevés dans les sols sableux que dans les sols argileux (2). Cet effet serait sensiblement annulé ici.



GRAPHIQUE 2. — K absorbé par les plantes en fonction des indices Morgan-Barbier modifiés.

Relations avec l'alimentation potassique des plantes.

Les relations entre les indices fournis par les tests Morgan-Barbier ainsi modifiés et l'alimentation potassique des plantes ont été examinées d'une part à l'aide d'essais en pots sur des terres de la région de Châteauroux, d'autre part sur les sols des champs d'essais de la Société Commerciale des Potasses d'Alsace déjà soumis à de nombreuses études (1).

a) *Essais en pots.* Ces essais ont été effectués avec des cultures de ray-grass soumises à des coupes successives, selon la technique indiquée par CHAMINADE (7). Afin de réaliser un épuisement suffisamment intense des sols, 300 g de terre ont été mélangés à 1 kg de sable, et additionnés de quantités de N, P, Ca, Mg couvrant largement les besoins des plantes. Les terres utilisées étaient très diverses (sols sableux, sols limoneux lessivés, sols argileux, rendzines...) ; le niveau de leurs réserves potassiques était assez bien connu d'après l'expérience culturale, et les analyses effectuées. La richesse en potassium de ces terres variait considérablement.

Le graphique 2 représente, en fonction des teneurs en K obtenues par le test Morgan-Barbier modifié, les quantités de potassium absorbées d'une part avant la première coupe (16 jours), d'autre part pendant toute la durée de la végétation (121 jours). On constate que l'alimentation potassique des plantes est une fonction assez étroite des indices Morgan-Barbier obtenus avec la technique décrite ci-dessus, surtout au moment de la première récolte, malgré la grande diversité des terres. Notons que les quantités de K absorbées avant la première coupe, soit 10 à 25 ppm de sol, correspondent sensiblement aux exportations annuelles des récoltes. Lorsque la végétation se poursuit, l'épuisement du sol est beaucoup plus poussé. Les coefficients de corrélations obtenus entre l'alimentation potassique des plantes (K absorbé avant la 1re coupe) et divers tests appliqués aux sols sont comparés ci-dessous :

K absorbé et :

rapport K/T	+ 0,45
rapport K/Ca	+ 0,66
Morgan Barbier acétate Na	+ 0,69
K échangeable	+ 0,77
Morgan Barbier acétate NH_4	+ 0,83

L'indice Morgan-Barbier modifié fournit donc, dans ces conditions, la meilleure corrélation.

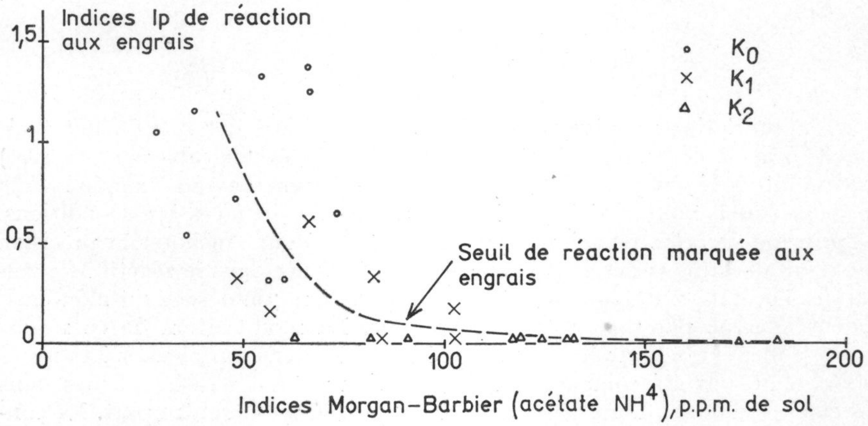
D'après l'expérience culturale concernant les terres mises en expérience, celles dont le niveau des réserves potassiques est normal, c'est-à-dire celles qui ne réagissent que peu ou pas aux fumures potassiques, sont caractérisées par une teneur en K extractible avec le réactif décrit supérieure à environ 90 ppm K (soit une concentration dans le liquide d'extraction, au rapport sol/solution = 1/2, supérieure à 45 mg/l K).

b) *Sols des champs d'essais de la S. C. P. A.* Les sols de ces champs d'essais ont été décrits dans un mémoire précédent, ainsi que le mode d'évaluation de l'intensité de la réaction des cultures aux engrais potassiques (1). Rappelons seulement que chaque champ comporte trois traitements : K_0 sans engrais potassiques depuis une dizaine d'années au moins, K_1 où les exportations des récoltes sont sensiblement compensées, et K_2 recevant des fumures potassiques renforcées. Les fumures azotées et phosphatées sont largement suffisantes, et identiques pour les trois traitements. L'intensité de la réaction aux engrais potassiques a été calculée sur la pomme de terre d'une part, plante très exigeante en potassium, sur l'ensemble des cultures d'autre part, d'après les moyennes des rendements de six années. On admet que les parcelles K_2 ne réagiraient pas sensiblement aux fumures potassiques, ce qui paraît hautement probable (les parcelles K1 ne réagissent que peu ou pas, selon les champs).

Le graphique 3 représente, en fonction des quantités de K extraites par le réactif Morgan-Barbier modifié, les indices Ip de réaction de la pomme de terre aux engrais dans les diverses parcelles de ces champs. La dispersion des points est comparable à celle que l'on obtient en portant en fonction des

mêmes indices les rapports K/T ou K/Ca (graphiques figurant sur le mémoire cité, référence 1). Une réaction nette aux engrais apparaît lorsque les teneurs. en K obtenues avec le réactif préconisé sont inférieures à 90 ppm environ. Le seuil correspondant aux besoins marqués en fumures potassiques est donc identique à celui qui a été observé dans les essais en pots.

Les coefficients de corrélation entre la réaction aux engrais d'une part et les tests qui se sont révélés les meilleurs d'autre part, sont rappelés ci-dessous :



GRAPHIQUE 3. — Indices Ip de réaction de la pomme de terre aux engrais potassiques en fonction des indices Morgan-Barbier modifiés

	Indices Ip (pomme de terre)	Indice Im (ensemble des cultures)
	—	—
Morgan Barbier, acétate d'ammonium ..	— 0,54	— 0,78
Rapports K/T	— 0,44	— 0,63
K/S......................	— 0,58	— 0,58
K/Ca......................	— 0,59	— 0,6
K échangeable	— 0,39	— 0,46

Le test Morgan-Barbier modifié s'avère donc dans l'ensemble comme le meilleur de ceux qui ont été appliqués. Les corrélations qui s'y rapportent sont significatives avec une probabilité d'environ 99 p. 100.

Conclusions.

Ces quelques essais montrent que le principe de la méthode Morgan-Barbier, appliquée à l'appréciation du niveau des réserves potassiques des sols, est valable. En faisant appel à un équilibre plutôt qu'à un épuisement, cette technique donne une indication des réserves *relative* au pouvoir adsorbant du sol. La fraction d'ions K^+ échangeables extraite est d'autant plus faible que le sol est plus argileux, ce qui peut permettre d'éviter dans l'interprétation des analyses un facteur de correction plus ou moins empirique. Celui-ci suppose d'ailleurs soit l'analyse physique, soit une connaissance très approfondie du terroir.

Conçue pour être appliquée au besoin sur le terrain, la méthode initialement décrite peut être notablement améliorée en remplaçant dans le réactif l'acétate de sodium par l'acétate d'ammonium, le dosage étant effectué par photométrie de flamme. Cette technique mérite ainsi d'être considérée comme

une méthode de laboraoire, parmi beaucoup d'autres, plutôt que comme un test plus ou moins sujet à caution. Sur le principe et dans les applications que nous en avons faites aprèsl'amélioration décrite, elle nous paraît nettement supérieure à la détermination du potassium échangeable, surtout lorsque l'on est en présence de types de sols très variés. Elle présente sur l'examen des rapports K/T, K/S ou K/Ca l'avantage d'une beaucoup plus grande rapidité, tout en paraissant présenter une sécurité comparable. Signalons enfin que la modification décrite change peu les résultats obtenus pour le phosphore ; à l'égard de cet élément, elle n'améliore nullement le principe de l'extraction.

RÉSUMÉ

L'appréciation du niveau des réserves potassiques des sols devant tenir compte à la fois de la valeur absolue de ces réserves (K échangeable par exemple,) et de l'intensité du pouvoir adsorbant du sol, nous avons examiné dans quelle mesure la méthode Morgan-Barbier peut satisfaire à ces deux conditions. Le principe de cette technique apparaît valable. Pour améliorer la précision des résultats, il nous paraît souhaitable de substituer dans le réactif Morgan-Barbier l'acétate d'ammonium à l'acétate de sodium ; le dosage est alors facilement effectué par photométrie de flamme. La modification de ce réactif entraîne une extraction plus intense de K dans les terres argileuses. Les résultats obtenus ont été comparés à l'alimentation potassique des cultures dans des champs d'essais d'une part, dans des essais en pots d'autre part. La concordance entre le test chimique et les données culturales est satisfaisante.

SUMMARY

Estimation of the level of potassium reserves in the soil : possibility of the use of the Morgan-Barbier test.

The suitability of the Morgan-Barbier test for estimating the absolute value of potassium reserves (for instance the exchangeable potassium) and of the potassium-fixing capacity of soils was determined. For improving the precision of the technique, ammonium acetate was substituted by sodium acetate, permitting measurement by flame photometry. The modification in the Morgan-Barbier reagent results in greater extraction of potassium in clayey soils. The values obtained by the test agreed well with data of the potassium nutrition of crops in field and pot experiments.

ZUSAMMENFASSUNG

Uber die Bewertung des Niveau der Kalireserven der Böden Verwendungsmöglichkeit eines Morgan-Barbier Testes.

Da die Bewertung des Niveau der Kalireserven des Bodens allemal dem absoluten Wert dieser Reserven (austauschbares K. zum Beispiel) und dem Sorptionsgrad des Bodens Rechnung tragen muss, so haben wir geprüft in welchem Masse, diesen beiden Bedingungen gegenüber, die Methode von Morgan-Barbier Genugtuung gewährt. Das Prinzip dieser Technik erscheint als gültig. Um die Genauigkeit der Resultate zu verbessern, erscheint es uns als

wünschenswert das Natriumazetat des Morgan-Barbier-Reagenzes durch Ammoniumazetat zu ersetzen ; die Bestimmung ist sodann leicht ausführbar durch Flammenphotometrie. Die Abänderung dieses Reagenzes hat eine intensivere Kaliextraktion bei tonhaltigen Böden zur Folge. Die erzielten Resultate wurden mit denen der Kaliernährung von Pflanzen in Feldversuchen einerseits, in Gefässversuchen andererseits, verglichen. Die Ubereinstimmung zwischen dem chemischen Test und der Kulturresultate ist zufriedenstellend.

Относительно оценки уровня запасов калия в почвах : возможность использования шкалы Морган-Барбье.

Р. БЛЯНШЭ и С. ПЕРИГО (Шатору).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Так как определение уровня запасов калия в почвах должно иметь в виду одновременно абсолютную величину этих запасов (обменный К, например) и интенсивность поглотительной способности почвы, то мы рассмотрели насколько метод МОРГАН-БАРБЬЕ может соответствовать этим двум условиям. Принцип этой техники, повидимому, действителен. Чтобы увеличить точность результатов, нам кажется желательным заменить в реактиве МОРГАН-БАРБЬЕ уксуснокислый натрий уксуснокислым аммонием; тогда определение производится легко фотометрией пламени. Изменение этого реактива вызывает более сильное извлечение калия в глинистых почвах. Полученные результаты были сравнены с калийным питанием полевых культур, с одной стороны, и с опытами в сосудах, с другой стороны. Соответствие между химическим определением и результатами культур удовлетворительно.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) STRASMAN (A.), QUIDET (P.) et BLANCHET (R.). — Dynamique du potassium dans le sol et alimentation potassique des plantes. *Ann. Agro.*, **5**, 635-658, 1958.

(2) BARBIER (G.). — Dosage rapide de P_2O_5 et de K_2O dans les sols en vue de fixer la fumure. *Ann. Agro.*, p. 208-222, 1941.

(3) CHAMINADE (R.). — Le potassium et la matière organique, Potassium Symposium. *Inst. Int. Pot.*, p. 203-214, 1955.

(4) MULDER (E. G.). — Mineral nutrition of plants. *Ann. Rev. of Plant Physiol.*, **1**, p. 1-24, 1950.

(5) COLLIER (D.) et GACHON (L.). — Étude de la méthode Barbier-Morgan. *Ann. Agro.*, p. 501-513, 1951.

(6) BLANCHET (R.). — Énergie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes. *Ann. Agro.*, 1, p. 5-52 et 2, p. 125-153, 1959.

(7) CHAMINADE (R.). — Influence de la matière organique sur l'efficacité de l'azote. *Ann. Agro.*, **2**, p. 177-192, 1958.

546. 18 : 545

NOTE ANALYTIQUE

OBSERVATIONS SUR LE DOSAGE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE DANS LES VÉGÉTAUX

PAR

R. GROSMAN
Station d'Agronomie, Dijon.

Dans de nombreux laboratoires, l'analyse minérale des végétaux est précédée d'une minéralisation par voie sèche à température modérée. Les cendres ainsi obtenues sont mises en solution chlorhydrique, et, sur cette solution, on procède aux dosages des éléments recherchés. L'acide phosphorique y est généralement dosé par la méthode colorimétrique au métavanadate.

On a longtemps admis qu'une minéralisation spéciale était nécessaire pour le dosage de l'acide phosphorique, afin d'éviter les pertes en cours de calcination. Cette minéralisation spéciale était effectuée en présence d'un large excès de sel alcalino-terreux.

On a, depuis, reconnu que cette précaution pouvait être évitée, les risques de perte étant négligeables en opérant à basse température (450°). Le fait de n'effectuer ainsi qu'une seule minéralisation pour le dosage de l'acide phosphorique et des cations représente un gain appréciable de temps.

Par contre, une difficulté supplémentaire apparaît du fait qu'une fraction non négligeable de l'acide phosphorique se retrouve dans les cendres à l'état non d'orthophosphates mais de pyrophosphates (1).

Les pyrophosphates échappent aux réactions ordinaires des orthophosphates (phosphomolybdate d'ammonium, métavanadate). Une hydrolyse préalable est nécessaire afin de les transformer en orthophosphates. Les techniques, généralement proposées, consistent en une courte ébullition dans l'acide nitrique à 10 p. 100 (2-3).

Malgré les précautions indiquées par ces derniers auteurs, nous avons obtenu des résultats inconstants dans l'analyse de végétaux riches en acide phosphorique et très pauvres en calcium (fourrages provenant de prairies temporaires à base de graminées). Nous avons été ainsi amenés à préciser les conditions de transformation des pyrophosphates en orthophosphates ; d'une part en solution pure ; d'autre part, sur des échantillons de végétaux.

I. — Hydrolyse du pyrophosphate.

Pour l'étude des conditions d'hydrolyse du pyrophosphate, nous nous sommes placés dans des conditions de concentration voisines de celles réalisées dans les extraits végétaux. Nous avons été ainsi conduits à opérer sur une quantité fixe de 4 mg de P_2O_5 (sous forme de $P_2O_7Na_4$) soumise à des temps de

chauffe variables, en présence de quantités croissantes de NO_3H ou ClH à 10 p. 100.

Les conditions de température sont assez difficiles à définir, surtout avec les faibles quantités d'acide pour lesquelles l'ébullition n'est pratiquement pas réalisable dans les conditions opératoires courantes. Elles ne sont pratiquement définies que par le temps de chauffe : il en résulte une certaine incertitude sur la température du liquide, ce qui explique une certaine dispersion dans les résultats.

TABLEAU I

Hydrolyse du Pyrophosphate de sodium
(à partir d'une quantité initiale de 4 mg de P_2O_5).

Temps de chauffe	Quantité NO_3H 10 %					Quantité ClH 10 %	
	3 cc	5 cc	10 cc	15 cc	20 cc	10 cc	20 cc
5 min......	3,00 —	3,10 —	1,00 1,90	2,20 —	— —	— —	— —
10 min.....	—	—	2,70	—	—	—	—
15 min.....	— — — — —	— — — — —	3,60 3,80 4,00 3,60 3,30	3,90 4,00 — — —	— — — — —	3,80 3,60 3,70 3,50 —	— — — — —
20 min.....	— — —	— — —	3,50 3,70 4,00	4,00 3,90 —	— — —	3,30 4,00 3,30	— — —
2 h........	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	4,00 4,00 4,00 3,95	— — — —	3,95 3,95 4,00 4,00

L'examen de ces résultats montre que :

1° Pour des conditions expérimentales voisines, la quantité de pyrophosphate hydrolysée est plus grande avec l'acide nitrique qu'avec l'acide chlorhydrique.

2° L'hydrolyse complète exige une quantité d'acide nitrique assez élevée (pour permettre d'assurer l'ébullition) et un temps de chauffe minimum de 15 minutes.

II. — Essais sur matériel végétal.

La nécessité d'effectuer l'hydrolyse des pyrophosphates avant de procéder aux dosages dans les extraits végétaux est d'autant plus grande que le matériel est plus pauvre en cations et plus riche en acide phosphorique.

Le tableau II donne les résultats obtenus sur des échantillons de dactyle d'origine différente.

	A	B
K %................................	2,90	3,69
Na %..............................	0,58	0,45
Ca %	0,44	0,53
Mg %..............................	0,18	0,16

TABLEAU II

Dosage du P_2O_5 dans des échantillons végétaux (Résultats moyens). Conditions d'hydrolyse variables.

Conditions d'hydrolyse		Echantillon A	Echantillon B
Acide	Temps de chauffe		
Sans hydrolyse		0,56	0,75
10 cc NO_3H à 10 %	10 min.	0,60	0,93
10 cc ClH à 10 %	10 min.	0,58	0,88
10 cc NO_3H à 10 %	45 min.	0,65	0,98

Ces résultats confirment ainsi, sur matériel végétal, les observations faites directement sur le pyrophosphate.

Conclusions.

Les laboratoires sont souvent amenés à procéder à l'analyse d'échantillons végétaux provenant de prairies temporaires à base de graminées. Ces échantillons sont généralement riches en acide phosphorique, riches en potassium, mais pauvres en calcium. Lors de la calcination, une fraction de l'acide phosphorique se retrouve à l'état de pyrophosphates. Cette fraction est d'autant plus importante que le végétal est plus riche en acide phosphorique.

Avant le dosage proprement dit, il y a lieu de procéder à l'hydrolyse préalable des pyrophosphates. Mais, étant donné l'importance que peuvent prendre ceux-ci, les conditions généralement admises pour l'hydrolyse peuvent se trouver en défaut. Il est nécessaire d'augmenter le volume de la solution acide et de prolonger suffisamment le temps de chauffe.

RÉSUMÉ

Les échantillons de végétaux provenant de prairies temporaires à base de graminées sont généralement riches en acide phosphorique, et en potassium, mais pauvres en calcium. Lors de la calcination (450°) une fraction de l'acide phosphorique se retrouve à l'état de pyrophosphates.

L'auteur précise les conditions de transformation des pyrophosphates en orthophosphates, d'une part sur des solutions pures, d'autre part sur des échantillons de végétaux.

SUMMARY

Observations on the determination of phosphorus in plants. Analytical note.

Samples taken from temporary grassland of graminaceous character are generally rich in phosphorous and potassium, but poor in calcium. Ashing at 450°C changes part of the phosphorus into pyrophosphates.

The conditions leading to the transformation of pyrophosphates into orthophosphates were established in pure solutions and plant samples.

ZUSAMMENFASSUNG

Beobachtungen zur Bestimmung von Phosphorsäure in Pflanzen.
(*Kurzmitteilung.*)

Die Pflanzenproben von Gräsern welche von Wechselwiesen herrühren sind durchgehend reich an Phosphorsäure und Kalium, hingegen arm an Kalzium. Durch die Kalzinierung (450°) befindet sich ein Teil der Phosphorsäure in Form von Pyrophosphaten. Der Autor präzisiert, einerseits für seine Lösungen, andererseits für Pflanzenproben, die Umwandlungsbedingungen der Pyrophosphate in Orthophosphate.

Заметки относительно определения фосфорной кислоты в растениях.

Р. ГРОСМАН (Дижон).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Образцы растений выращенных на временных лугах, преимущественно злаковых, обычно богаты фосфорной кислотой и калием, но бедны кальцием. При сжигании (450°), часть фосфорной кислоты оказывается в состоянии пирофосфатов.

Автор точно определяет условия превращения пирофосфатов в ортофосфаты, с одной стороны на чистых растворах, с другой стороны на растительных образцах.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Piper (J.). — « Soil and Plant analysis ». *Interscience publ.*, New York, 1950.

(2) M^lle^ Mazoyer. — « Remarques sur le dosage de l'acide phosphorique des végétaux pauvres en constituants basiques ». *Travaux des Stations*, Antibes, 1956.

(3) Guegen (L.). — « Étude de la composition minérale de quelques espèces fourragères ». *Ann. de Zootechnie*, p. 245, 1959.

Le Directeur-Gérant : B. Laclavière.

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 22-10-1960.

Dépôt légal : 4e trimestre 1960 N° d'impression : 106

ERRATA

Annales agronomiques, nº 3-1960

Mémoire de M. Le Houérou : *Contribution à l'étude des sols du sud-tunisien.*

Page 247, deuxième paragraphe, ligne 5.

Il faut lire :

$$R = \frac{P^3}{3\,E^2}$$

au lieu de :

$$R = \frac{3\,E^2}{P^3}.$$

ANN. AGRONOMIQUES 11 (4, 1960)

ACTION STIMULANTE DE SUBSTANCES ORGANIQUES SUR LA CROISSANCE DE L'ASPERGILLUS NIGER

PAR

R. CHAMINADE

Station centrale d'Agronomie, Versailles

PLAN DU MÉMOIRE

Technique.

Milieu de culture.
Nature de la souche et ensemencement.
Culture.
Reproductibilité des résultats.

Résultats expérimentaux.

Humus naturels.
 Essais de purification :
 Résistance à la chaleur.
 Action des acides.
 Action des bases.
 Action des sels.
 Dialyse.
 Passage sur résines.

Essais sur différentes substances végétales.
Extraits de fraisier.
Passage sur résine.
Précipitation par l'acide chlorhydrique.
Extraits de paille de blé.

Influence de la fermentation sur l'activité.
 Synthèse de substances actives par les microorganismes.
 Comparaison de pailles fermentées et non fermentées.

Recherches sur la nature des substances actives.
 Action de l'humus d'hydroquinone.
 Oxydation directe de composés végétaux.

Résumé.

Dans des publications précédentes (1) nous avons montré que l'addition au milieu de culture de l'*Aspergillus niger*, de petites quantités d'acide humique extrait de milieux naturels augmentait la vitesse de

croissance de l'*Aspergillus*, de telle sorte que le rendement, après 48 heures de culture pouvait atteindre quatre fois le rendement obtenu dans les milieux sans humus. Les différences s'atténuaient avec le temps et le rendement après 6 jours de culture devenait le même dans les deux cas.

Les humus naturels utilisés dans ces expériences, avaient par ailleurs une action marquée sur la physiologie des plantes supérieures (2, 3, 4, 5, 6).

Le but des recherches exposées dans ce mémoire est de préciser la nature des substances actives sur l'*Aspergillus niger* et d'examiner dans quelles conditions elles se rencontrent ou peuvent prendre naissance dans des milieux naturels.

Les résultats portent sur plus de 20 000 cultures d'*Aspergillus*.

TECHNIQUE

Tout test biologique comporte inévitablement une erreur expérimentale élevée. En vue de réduire au minimum cette erreur, la mise au point de la technique a été particulièrement laborieuse.

Nous ne décrirons ici que le dernier dispositif adopté, grâce auquel les résultats ont une reproductibilité satisfaisante.

a) Milieu de culture.

Le milieu utilisé est le liquide de Nicholas (7) dont la composition est la suivante :

Glucose	50 g/litre
NO_3K	5
$(NO_3)_2Ca$ anh	0,6
SO_4Mg7H_2O	1
PO_4H_2Na	2,5
Sel de Mohr	5 mg/litre
SO_4Zn	2
SO_4Mn	0,3
SO_4Cu	0,6
Molybdate d'ammonium	0,5
$(NO_3)^2Co$	0,05
$(NO_3)_2Ni$	0,05
Vanadate de sodium	0,08

Le milieu est préparé, au moment de l'utilisation, par mélange de solutions mères stérilisées. Il est placé dans des cristallisoirs de 55 mm de diamètre à raison de 50 cc par cristallisoir.

b) Nature de la souche et ensemencement.

L'identification de la souche d'*Aspergillus* a été faite par J. Quemener (1) au Laboratoire de la S. E. C. P. I. A. à Argenteuil à l'aide de : *A manual of the Aspergelli*, de C. Thom et K. B. Raper. Les caractères

(1) Nous remercions bien vivement M. Quemener et la Société d'études chimiques pour l'Industrie et l'Agriculture de leur collaboration dans l'identification des souches d'*Aspergillus*.

morphologiques, microscopiques et macroscopiques des cultures permettent de rattacher l'espèce utilisée au groupe *Aspergillus fumigatus*.

Les cultures pures de l'espèce sont réalisées pendant 6 jours à 37° sur liquide de NICHOLAS. Le mycelium est séché à la température du laboratoire et les spores sont récoltées. La plus grosse partie des fragments de mycelium est séparée par tamisage au tamis 80 et les spores sont conservées à l'état sec à une température voisine de 0°.

L'ensemencement a lieu par addition de 40 γ de spores par cristallisoir. Pour cela, on prépare un mélange homogène de spores et de glucose tamisé au tamis 80, dans la proportion de 50 γ de spores pour 50 mg de glucose et on apporte par cristallisoir 40 mg de ce mélange. L'expérience montre que la proportion de spores peut varier sans inconvénient de ± 5 p. 100. Dans ces conditions, il suffit de mesurer, avec une spatule tarée, un volume correspondant à 40 mg de mélange glucose + spores.

c) CULTURE.

Les cristallisoirs sont immergés dans un bain-marie thermostatique réglé à une température de 37 ± 0,1° de telle sorte que l'eau du bain-marie arrive au même niveau que le liquide des cristalloirs. Le bain-marie est recouvert d'un couvercle isolant afin d'éviter l'évaporation.

L'aération doit être soigneusement réglée. Elle est obtenue à l'aide d'un aérateur d'aquarium, dégageant dans l'eau du thermostat de fines bulles d'air à un débit de l'ordre de 13 litres par heure. Le thermostat à une dimension de 35 × 65 cm et le volume d'air surmontant les cristalloirs est d'environ 30 litres.

On peut placer par thermostat, 60 cristallisoirs.

Le thermostat étant amené à la température de 37°, on immerge les cristallisoirs. En raison du grand volume d'eau du thermostat (50 litres) l'équilibre de température s'établit très rapidement.

La récolte a lieu après 48 heures de culture. Le mycelium est recueilli sur entonnoir de Büchner, soigneusement lavé et pesé après dessication à 60°.

Les conditions de culture doivent être minutieusement réglées. De faibles variations de température ou d'aération amènent des modifications dans les rendements.

d) REPRODUCTIBILITÉ DES RÉSULTATS.

Malgré toutes les précautions, une certaine dispersion des résultats est inévitable. Voici, à titre d'exemple, les courbes de fréquence obtenues dans un essai comportant la comparaison de 30 témoins et de 30 échantillons additionnés d'acide humique à la dose de 0,5 γ/cc (Graphique 1).

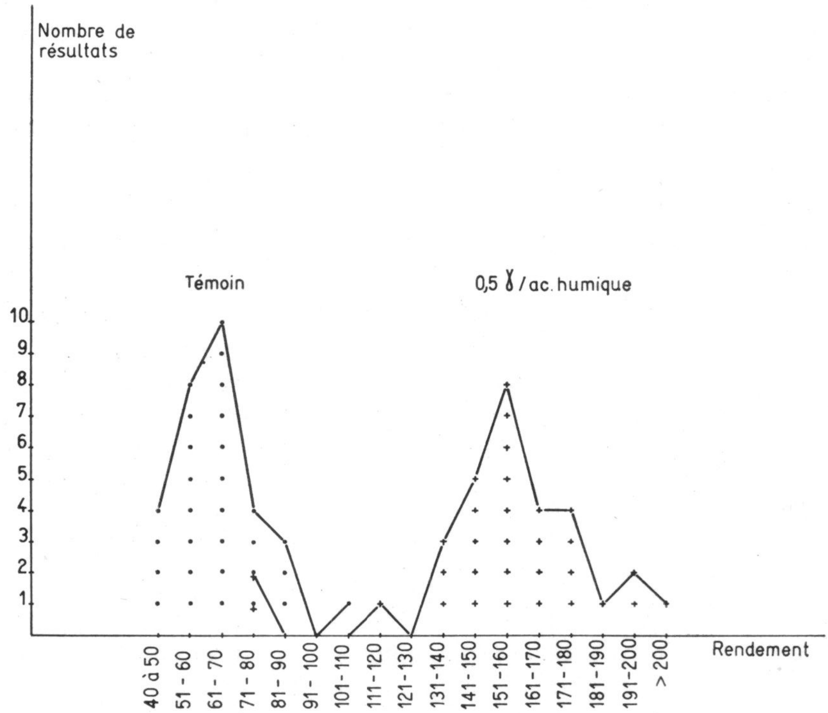
Les moyennes obtenues ont été les suivantes :

Témoins : 64,13 mg.

0,5 γ/cc acide humique : 156,32 mg.

Bien que l'essai soit hautement significatif les courbes de fréquence montrent que quelques valeurs sont aberrantes.

Les résultats ci-après sont tous exprimés en indices de comparaison par rapport aux témoins. Il s'agit dans tous les cas de comparaisons réalisées dans un même thermostat, entre les témoins et les échantillons testés.



GRAPHIQUE 1. — Comparaison de 30 Témoins et de 30 échantillons additionnés de 0,5 γcc d'acide humique. Courbes de fréquence des résultats.

Dans ces conditions, la comparaison est légitime. Par contre, la répétition d'une même expérience peut amener à des résultats qui, bien que dans le même sens, ne se traduisent pas par des indices de comparaison identiques ; il arrive en effet, que pour des causes aléatoires, non contrôlables, la croissance des témoins varie d'une expérience à l'autre (de 50 à 90 mg). L'expérience montre que l'effet d'une même substance de croissance est relativement d'autant plus marquée que la croissance des témoins a été plus faible. Il en résulte une variation des indices de comparaison. Toutefois, la conclusion de l'expérience n'en est pas modifiée. L'étude statis-

tique des résultats montre qu'avec cinq répétitions le résultat est toujours hautement significatif lorsque l'indice de comparaison atteint 200.

Voici à titre d'exemple les résultats de la répétition d'un essai relatif à l'action de 0,5 γ/cc d'un acide humique. Cet essai est l'un de ceux pour lesquels la variabilité était la plus élevée.

1[er] *essai* : Témoins : 47, 58, 60, 62, 91, moyenne : 63,6.

0,5 γ acide humique : 162, 164, 130, 200, 166, moyenne : 164.

I. C. : 256.

2[e] *essai* : Témoins : 50, 90, 71, 74, 94, moyenne : 80.

0,5 γ acide humique : 120, 237, 166, 249 (4 répétitions), moyenne : 193.

I. C. : 241.

Calcul statistique :

1[er] *essai* : Variance de la différence : 177.

Écart type . 13,6.

$$t = \frac{101}{13{,}6} = 7{,}4.$$

Essai très hautement significatif ($p = 0{,}01$ pour $t = 3{,}707$).

2[e] *essai* : Variance de la différence : 742.

Écart type : 27,2.

$$t = \frac{113}{27{,}2} = 4{,}2.$$

Essai très hautement significatif ($p = 0{,}01$ pour $t = 3{,}499$). On voit que les conclusions de ces deux essais sont identiques bien que les indices de comparaison soient différents (256 et 241).

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Humus naturels

Dans le mémoire précédent (1) ont été exposés des résultats portant sur des humus extraits de milieux naturels.

De nombreux autres essais ont été réalisés sur des produits analogues. Pour les sols et les terreaux, l'extraction est effectuée par l'oxalate d'ammonium. Les fumiers sont traités à l'aide d'une solution ammoniacale,ou simplement à l'eau pure. L'acide humique est séparé par précipitation à l'acide chlorhydrique.

L'activité des humus d'origines diverses est toujours positive, quoique d'intensité variable.

Essais de purification. — L'activité de ces humus extraits de milieux naturels étant établie, le problème se posait de l'isolement des substances responsables de l'activité.

a) Résistance a la chaleur.

Ces substances sont très résistantes à la chaleur.

Un extrait obtenu en traitant à l'autoclave par l'eau à 134° pendant 30 minutes une paille fermentée (1 g de paille dans 1 000 cc d'eau) est actif sur l'*Aspergillus* à la dose de 2 γ/cc (I. C. 234).

Cette constatation, mainte fois vérifiée justifie le mode de traitement fréquemment utilisé dans la suite de ce travail.

b) Action des acides.

Un extrait humique, obtenu par traitement d'un terreau à l'oxalate d'ammonium, a été précipité par l'acide sulfurique à la concentration 3,6 N. L'acide humique précipité a été lavé et neutralisé par la soude.

Parallèlement, la fraction restée en solution acide, représentant les acides fulviques a été dialysée pour séparer l'oxalate et l'acide sulfurique.

Le test *Aspergillus* sur les deux fractions (acides humiques et acides fulviques) a donné les résultats suivants :

(*Indices de comparaison*)

Acides humiques	5 γ/cc	136
—	10 γ/cc	144
—	20 γ/cc	156
—	30 γ/cc	161
—	50 γ/cc	160
Acides fulviques	5 γ/cc	111
—	10 γ/cc	118
—	20 γ/cc	122
—	30 γ/cc	122
—	50 γ/cc	140

Le résultat est significatif à $p = 0{,}01$ à partir de 5 γ/cc pour les acides humiques et 10 γ/cc pour les acides fulviques. On voit que, bien que les acides humiques soient plus actifs que les acides fulviques, la fraction soluble en milieu acide renferme encore des substances actives.

Des résultats identiques sont obtenus par précipitation à l'acide chlorhydrique et à l'acide formique.

c) Action des bases.

Une suspension d'acide humique a été additionnée d'eau de chaux à la concentration N/70. La floculat a été séparée par centrifugation et les deux fractions amenées à volumes égaux ont été testées. Les indices de comparaison ont été les suivants :

Fraction floculée	236
Liquide clair	206

On voit que, comme dans le cas de la séparation par les acides, l'activité se retrouve dans les deux fractions.

d) Action des sels.

Un humate d'ammonium neutre actif sur l'*Aspergillus* a été traité par du sulfate d'ammonium à 1/2 saturation. Une fraction de l'humus précipite sous l'influence à ce réactif.

Les fractions floculée et non floculée ont été dialysées jusqu'à élimination du sulfate d'ammonium et testées à l'*Aspergillus*. Les résultats suivants ont été obtenus (Indice de comparaison. Résultats significatifs à $p = 0{,}01$).

Fraction précipitée :

2 γ/cc	117
5 γ/cc	129

Fraction soluble :

5 γ/cc	118

Dans les deux fractions on rencontre des substances actives sur l'*Aspergillus*.

e) Dialyse.

La dialyse sur cellophane ne permet pas la séparation des substances actives qui se retrouvent à la fois dans la fraction dialysable et non dialysable. Les résultats sur ce point sont exposés plus loin. On peut en conclure que les substances actives présentent des dimensions moléculaires variables.

f) Passages sur résines.

Les substances actives ne sont pas retenues sur les échangeurs d'ions cationiques ou anioniques. Ce fait indique qu'il ne s'agit pas de corps ionisés.

Les essais de séparation rapportés ci-dessus et dont nous donnerons d'autres exemples au cours de ce travail montrent l'impossibilité, quelle que soit la méthode utilisée, de pousser très loin la purification des substances actives.

Ces substances sont de nature organique. Leur action disparait par calcination (1) ou par traitement à l'eau oxygénée concentrée.

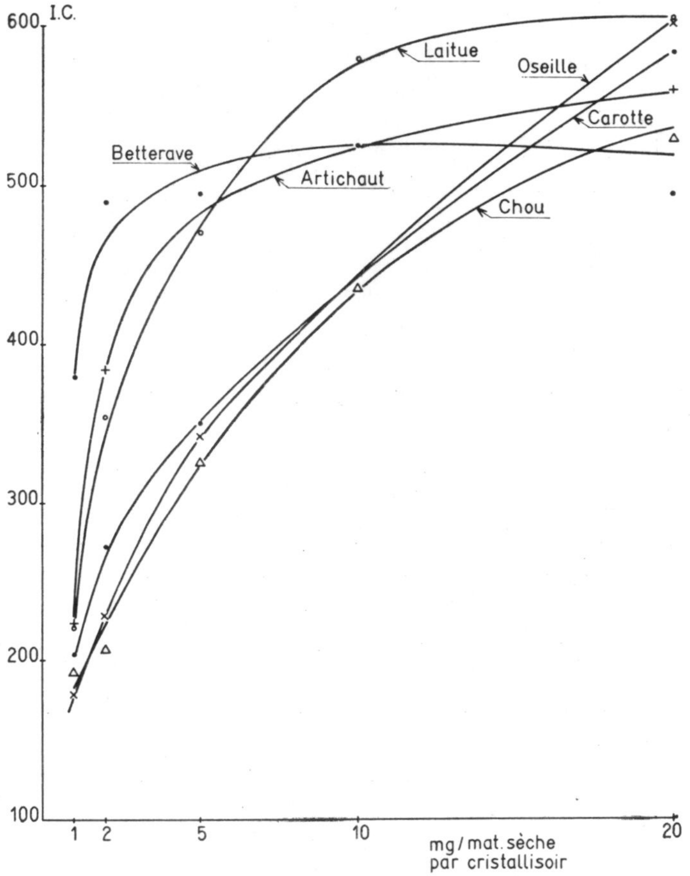
Le test *Aspergillus* sur un acide humique traité par H_2O_2 à 50 volumes a donné le résultat suivant :

		I. C.
Acide humique témoin	0,2 γ/cc	100
	0,4 γ/cc	99,5
	1 γ/cc	104
	1,5 γ/cc	183
	2 γ/cc	204
Acide humique traité par H_2O_2	0,2 γ/cc	94
	0,4 γ/cc	91
	0,4 γ/cc	91
	1 γ/cc	99,5
	1,5 γ/cc	102
	2 γ/cc	125

Ces faits suggèrent l'hypothèse que l'action stimulante est dûe, non à une substance définie mais à un groupe de corps organiques possédant une fonction commune.

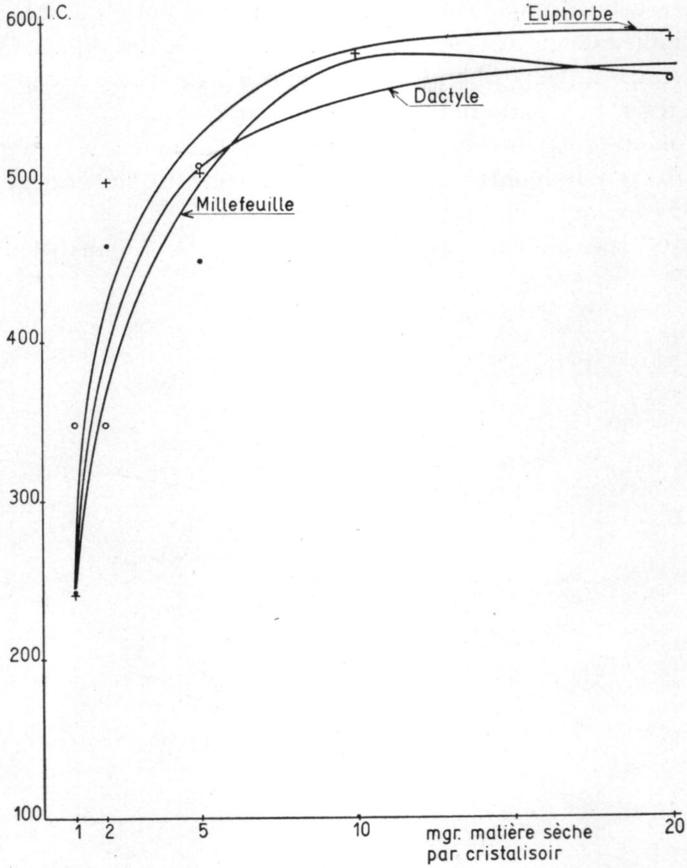
Essais sur différentes substances végétales

Les premiers essais avaient été entrepris sur des humus c'est-à-dire des matières organiques d'origine végétale ayant subi l'action de micro-organismes. Nous avons déjà établi, dans le mémoire précédent (1).



Courbes 2. — Action de divers végétaux sur l'*Aspergillus*. Addition directe au milieu de culture.

qu'une paille n'ayant subi aucune fermentation préalable renfermait déjà des substances actives sur l'*Aspergillus*. Pour vérifier la généralité de cette constatation, un certain nombre de végétaux et d'extraits végétaux ont été testés.



COURBES 3. — Action de divers végétaux sur l'*Aspergillus*. Addition directe au milieu de culture.

Les essais ont été réalisés sur les matériaux suivants :

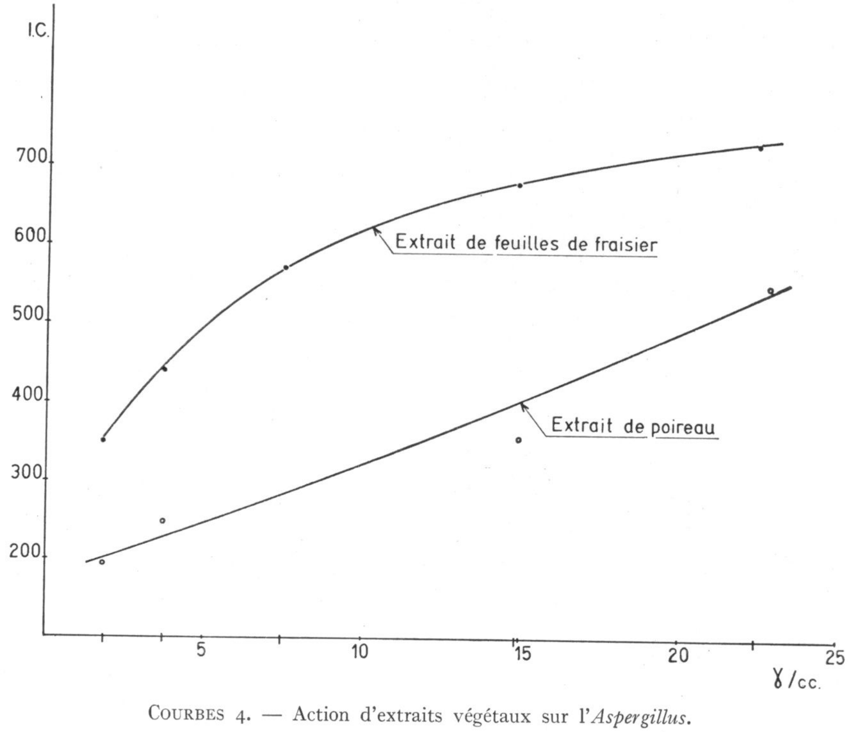
Paille de blé.

Feuilles de fraisier ;
— carottes ;
— millefeuille ;
— d'artichaut ;
— laitue ;
— séneçon ;
— fétuque ;
— dactyle ;
— chou ;
— poireau ;
— euphorbe ;
— morelle ;
— capselle ;
— oseille ;
— betterave.

Ces végétaux appartenant à diverses familles ont été testés par addition au milieu de culture, soit de poudre desséchée des organes végétaux soit d'extraits aqueux obtenus en traitant à l'autoclave à 130° pendant 30 minutes 1 g de matière première par 100 cc d'eau.

Le mode d'extraction n'influe pas sur l'activité de l'extrait. Des essais directs ont montré que des résultats identiques étaient obtenus par extraction à 50 ou 100°.

Les courbes ci-contre expriment les résultats obtenus (Courbes 2-3-4-5).



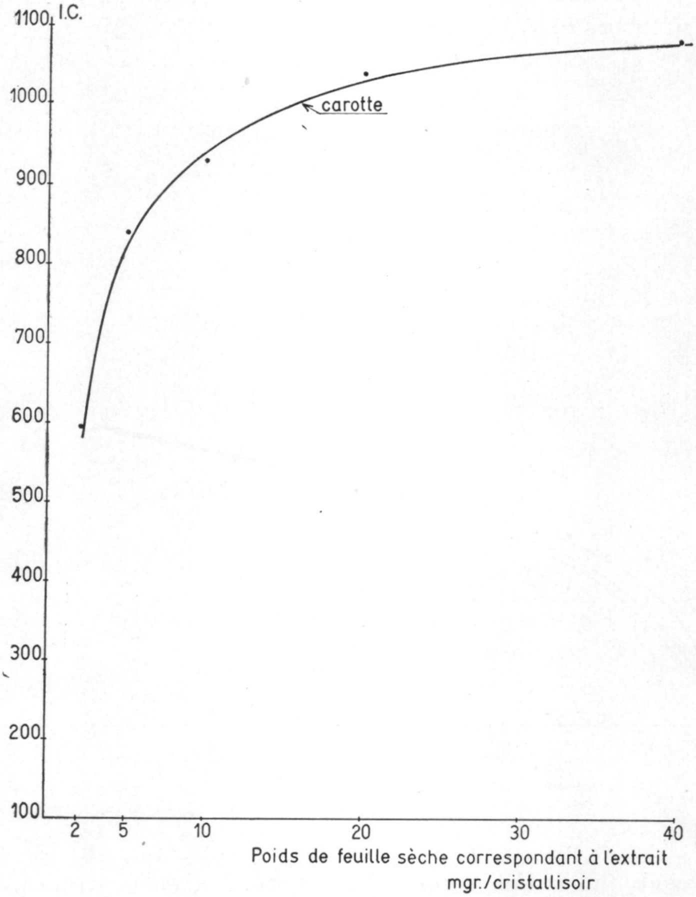
COURBES 4. — Action d'extraits végétaux sur l'*Aspergillus*.

L'addition au milieu de culture de poudres de feuilles desséchées à des doses de 1 à 20 mg pour 50 cc de liquide de culture accélère considérablement le développement de l'*Aspergillus*.

D'autre part, tous les extraits aqueux, ont montré une action semblable. Un extrait aqueux de feuilles de fraisier, par exemple donne déjà un indice de comparaison de 350 à la dose de 1,86 γ/cc. Avec des doses plus élevées, de l'ordre de 300 γ/cc, on obtient pour la plupart des extraits végétaux une récolte d'*Aspergillus*, après 48 heures de culture, qui dépasse le décuple de la récolte témoin.

On constate ainsi que les substances activant la croissance de l'*Aspergillus* sont très répandues chez toutes les espèces végétales.

Malgré la présence dans ces extraits bruts d'un mélange complexe de substances organiques et minérales (le traitement aqueux à 134° de feuilles de fraisier permet de faire passer en solution près de 50 p. 100 de



COURBE 5. — Action d'extraits de feuilles de Carotte sur l'*Aspergillus*.

la matière sèche) leur activité s'exerce à de très faibles doses. En vue de « concentrer » les substances actives divers traitements ont été essayés.

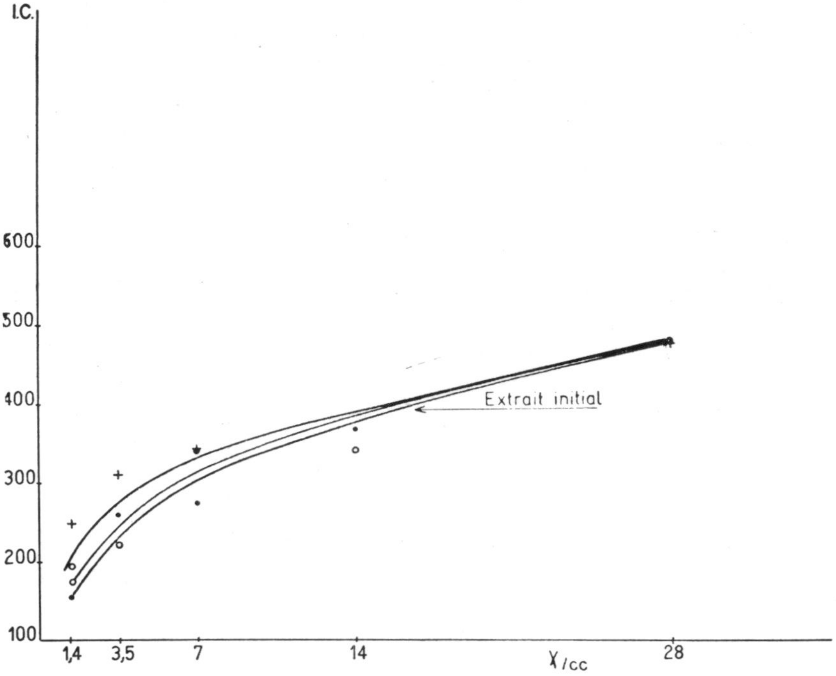
Nous ne rapporterons ici que ceux qui ont été réalisés sur extraits de fraisier et paille.

Essais sur extraits de fraisier

PASSAGE SUR RÉSINES. — Un extrait aqueux de feuilles de fraisier, d'une concentration totale en matière sèche de 4 mg/cc a été passé sur une résine cationique (Permutite 50 régénérée par ClH) et une résine anionique (Amberlite IRA régénérée par $CO_3 Na_2$).

Les concentrations en matière sèche sont passées de 4 mg/cc à 3,23 après passage sur permutite 50 et à 2,57 après passage sur Amberlite.

Les résultats du test *Aspergillus* réalisé sur l'extrait initial et les extraits ayant traversé les résines sont représentés dans le graphique suivant (Courbes 6).



COURBES 6. — Comparaison d'extraits de feuilles de fraisier, avant et après passage sur résines. (En abscisse sont portées les quantités correspondantes d'extrait initial).

On voit que si l'on rapporte l'activité aux concentrations correspondantes en extrait initial celle-ci n'a pas été modifiée. Aucune des deux résines n'a donc fixé de substance active. Ce fait confirme que la déminéralisation des extraits n'en modifie pas l'activité qui est liée à des corps organiques non ionisés.

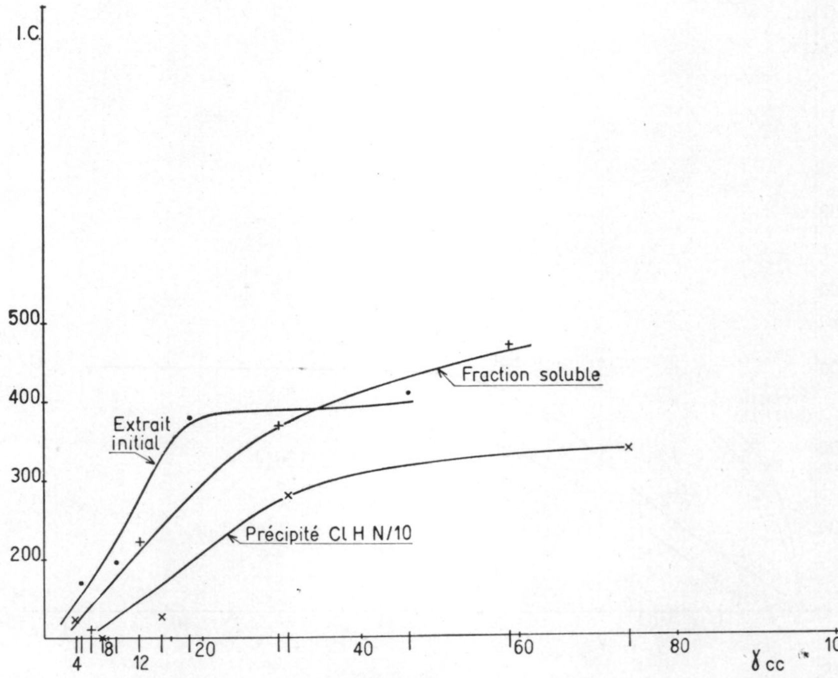
PRÉCIPITATION PAR L'ACIDE CHLOHYDRIQUE.

Des échantillons de 20 cc d'extrait, correspondant à 92,2 mg de matière sèche, ont été traités par l'acide chlorhydrique à des concentrations allant de N/10 à 2 N. La partie précipitée a été séparée par centrifugation, lavée et remise en solution dans l'ammoniaque N/50. La partie soluble, amenée à sec à été reprise par l'ammoniaque à la même concentration.

La répartition de la matière sèche entre les deux fractions était la suivante :

	Fraction soluble	Fraction précipitée (par différence)
	—	—
ClHN/10	84,75	7,45
N/5	83,5	8,7
N/2	82,25	9,95
N	81,75	10,45
2N	81,12	11,08

Au test *Aspergillus*, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les activités des précipités obtenus en présence des différentes concentrations en acide chlorhydrique.



COURBES 7. — Précipitation par ClH à différentes concentrations, de l'extrait de feuilles de fraiser (En abscisse, les quantités correspondantes d'extrait initial)

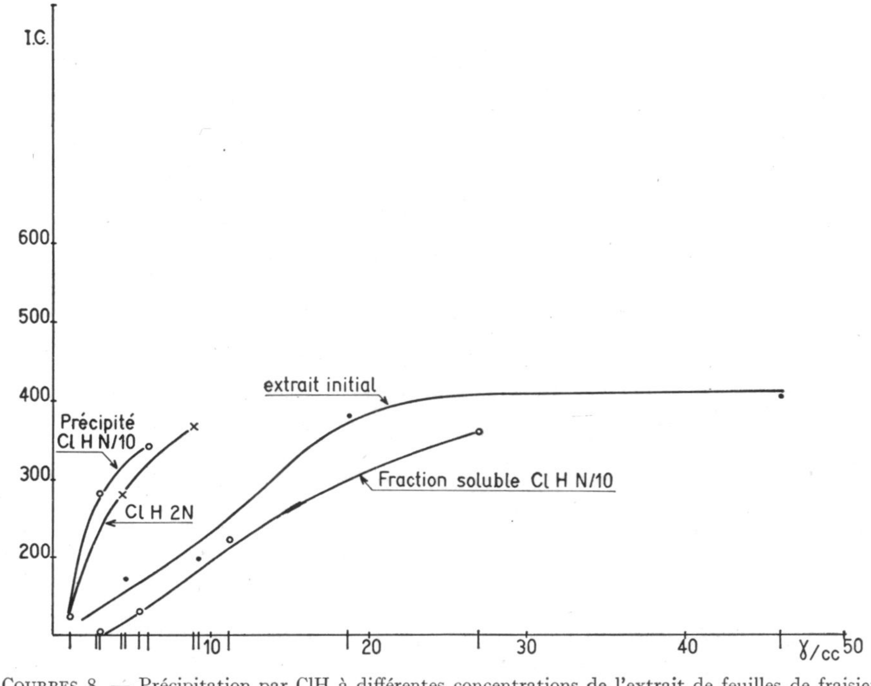
Les courbes (8) montrent que l'activité du précipité est très notablement plus élevée à concentration égale que celle de l'extrait initial. Cependant l'activité se répartit dans les deux fractions. Ce fait ressort nettement de l'examen des courbes (7) dans lesquelles on a porté en abscisses pour chacune des fractions les quantités correspondantes de l'extrait initial.

Toutefois, la précipitation permet une certaine « concentration » des substances actives. On peut tenter une évaluation conventionnelle et

approximative de l'activité pour l'extrait sec total et chacune des fractions, par le rapport $A = \frac{\text{matière sèche}}{\text{Concentration correspondant à I. C. 300}}$

Extrait total...............	$A = \frac{92,2}{14} = 6,58$	100 %
Précipité ClHN/10..........	$A = \frac{7,45}{4} = 1,85$	28,2
Fraction soluble............	$A = \frac{84,75}{18} = 4,70$	71,4

On voit que le précipité, qui ne représente que 8 p. 100 de la matière sèche totale, renferme 28 p. 100 de l'activité.



COURBES 8. — Précipitation par ClH à différentes concentrations de l'extrait de feuilles de fraisier. (En abscisse, quantités de matière sèche de chaque fraction).

Il est impossible de pousser plus loin la purification par ce procédé. Les précipitations successives par l'acide chlorhydrique n'ont pas permis d'obtenir des précipités ayant, pour des concentrations identiques, une activité plus marquée.

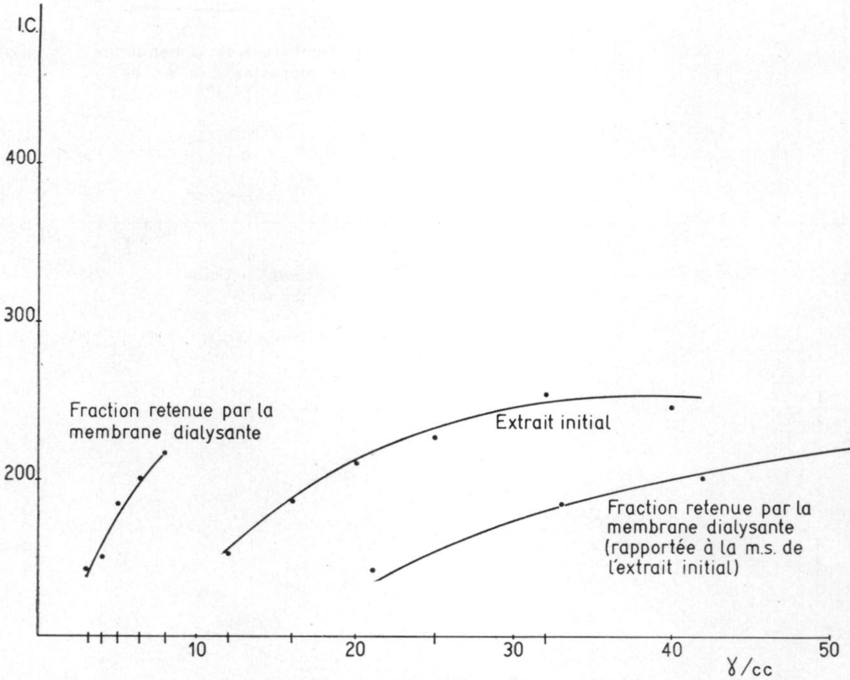
Essais sur extraits de paille de blé

Les essais de séparation ont été réalisés sur un extrait obtenu en traitant à l'ébullition 200 g de paille non fermentée par 2 000 cc d'eau. L'extrait obtenu renfermait 6,04 mg de matière sèche par cc.

Nous indiquons dans le tableau ci-après les traitements réalisés ainsi que les poids de chaque fraction, ceux-ci étant rapportés à 100 cc d'extrait initial.

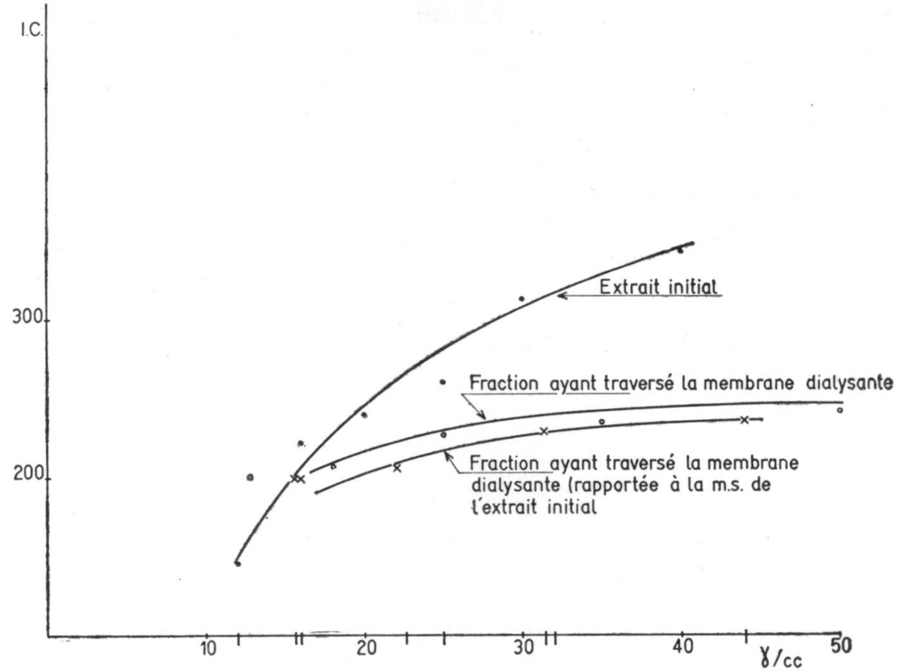
	Nos	Poids de matière sèche
I. Extrait initial	1	604
Dialyse sur cellophane : fraction non dialysable	2	109
fraction dialysable	3	480
Précipitation de 1 par ClH, N : précipité	4	64,5
Filtrat dialysé	5	49,6

Les courbes ci-contre donnent les résultats du test *Aspergillus* (Courbes 9 et 10).

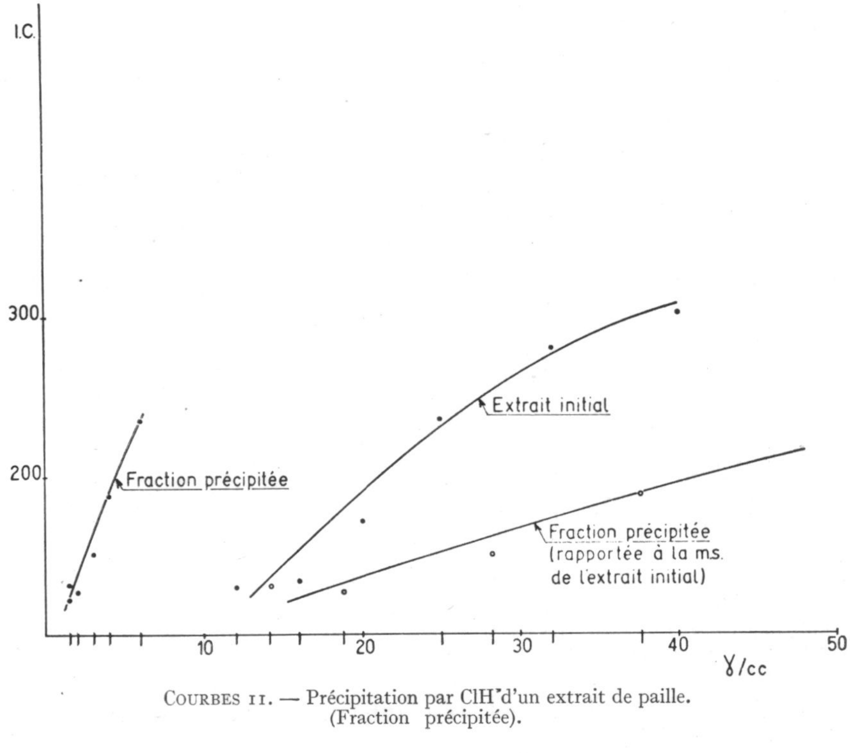


COURBES 9. — Action de la dialyse sur l'extrait de paille. (fraction retenue par la membrane dialysante).

La dialyse permet une « concentration » de la substance active ; l'indice de comparaison 200, par exemple, est obtenu avec une concentration de 18 γ/cc pour l'extrait initial et de 6,6 γ/cc pour la fraction retenue par la membrane dialysante. Toutefois, si l'on exprime les résultats obtenus pour la fraction dialysée en fonction de la quantité correspondante de l'extrait initial on voit qu'une partie de l'activité a traversé la membrane dialysante. Ce résultat est confirmé (courbes 10) par le test réalisé directement sur la fraction ayant traversé la membrane.



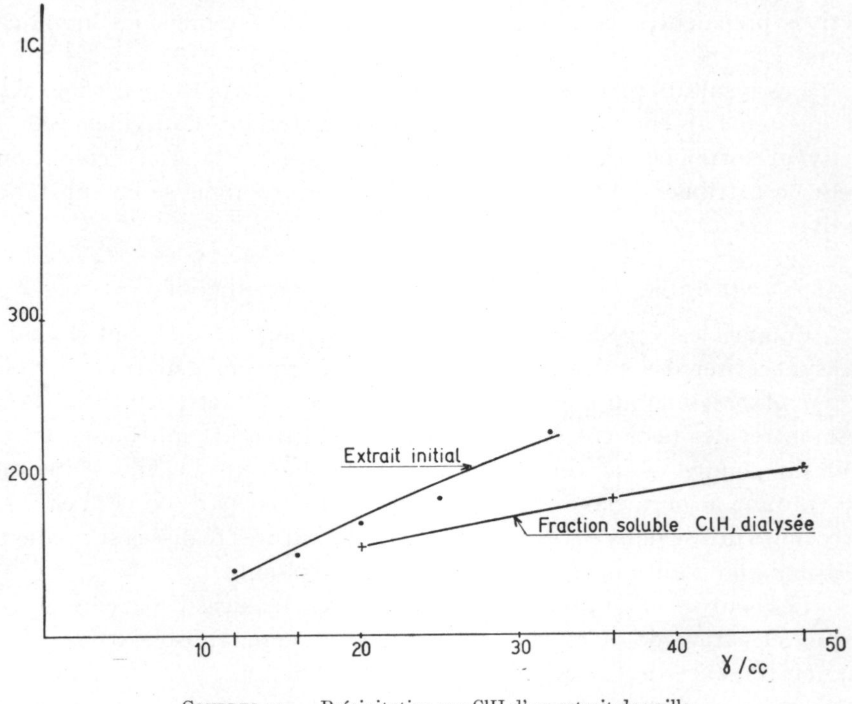
COURBES 10. — Action de la dialyse sur l'extrait de paille. (fraction ayant traversé la membrane dialysante).



COURBES 11. — Précipitation par ClH d'un extrait de paille. (Fraction précipitée).

De même, la précipitation par ClH sépare une fraction très active, mais, là encore, la totalité ne se rencontre pas dans la fraction précipitée (courbes 11).

La fraction soluble dans l'acide chlorhydrique présente encore une activité (courbes 12). Dans ce dernier cas, le test n'a pu être réalisé qu'après dialyse afin d'éliminer l'acide chlorhydrique utilisé pour la précipitation ; dans ces conditions, une partie des substances actives solubles dans l'acide chlorhydrique ont été perdues au cours de la dialyse et l'activité restante est faible. (Pour I. C. 200 : 400 γ/cc correspondant à 535 γ d'extrait initial).



COURBES 12. — Précipitation par ClH d'un extrait de paille. (Fraction soluble).

En résumé on peut approximativement évaluer la répartition de l'activité dans les différentes fractions, de la façon suivante :

	Activité
Extrait total	100
Fraction retenue par le dialyseur	60
Fraction non retenue	40
Fraction précipitée par ClH, N	60
Fraction soluble ClH, après dialyse	5

Ces faits confirment ceux exposés précédemment et montrent que l'activité peut exister chez des substances possédant certaines propriétés

différentes (dialysables ou non, précipitables par les acides ou non). Il est très vraisemblable que l'activité physiologique est liée à un caractère constitutif commun, celui-ci pouvant être la présence d'une même fonction organique. D'autres arguments sont exposés plus loin en faveur de cette hypothèse.

Influence de la fermentation sur l'activité,

Les premiers essais avaient été réalisés sur des humus, c'est-à-dire des produits organiques de néo formation, résultant de la fermentation de matières végétales. L'hypothèse de départ supposait que les substances actives prenaient naissance sous l'action des microorganismes humificateurs.

Les résultats précédents montrent que cette hypothèse est inexacte et que, en l'absence de fermentation, des matériaux d'origine végétale activent fortement la croissance de l'*Aspergillus*. Dans ces conditions peut-on attribuer à l'humification un rôle dans la richesse en substance active ?

Synthèse des substances actives par les microorganismes.

Comme les végétaux supérieurs, les microorganismes sont capables de synthétiser des substances actives sur la croissance de l'*Aspergillus*.

L'Aspergillus lui-même est capable d'effectuer cette synthèse. Pour le montrer des tests ont été réalisés après addition au milieu de culture, soit de poudre de mycelium stérilisé et séché soit d'extraits obtenus en traitant à l'autoclave à 134°, 1 g de mycelium par 100 cc d'eau. Le mycelium utilisé dans ces essais provenait de cultures réalisées sur milieux témoins non additionnés de substances de croissance.

Les courbes (13-14) montrent que dans les deux cas il y a eu une très forte activation de la croissance. L'indice de comparaison atteint déjà 300 en présence de 8 γ/cc d'extrait de mycelium.

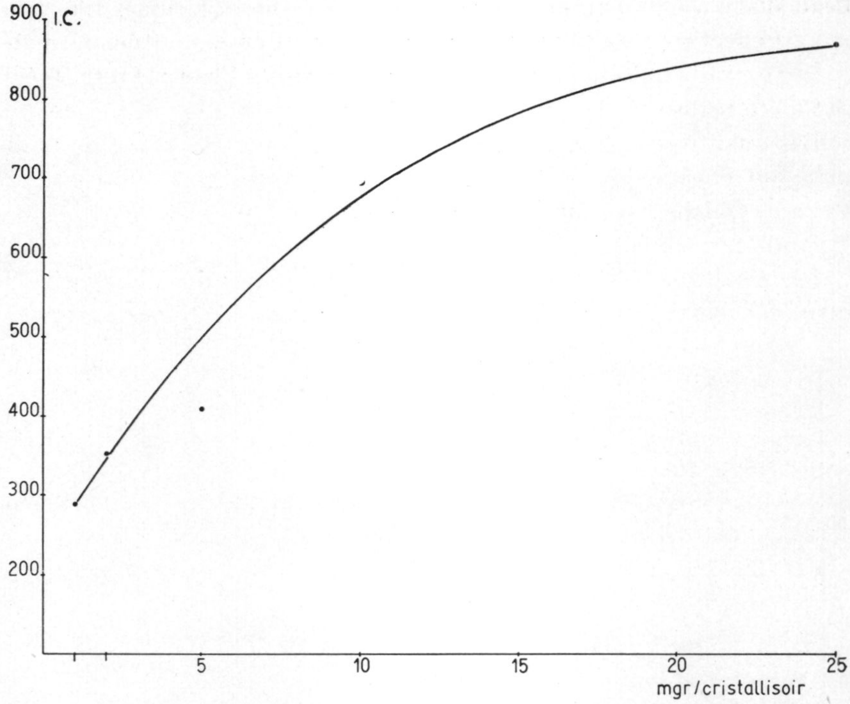
On peut donc supposer que sous l'influence de l'humification la synthèse de substances actives par les microorganiques provoquera un enrichissement du milieu. Les essais, sur ce point ont été réalisés en comparant une paille de blé ayant subi ou non l'humification.

Comparaison de pailles fermentées et non fermentées.

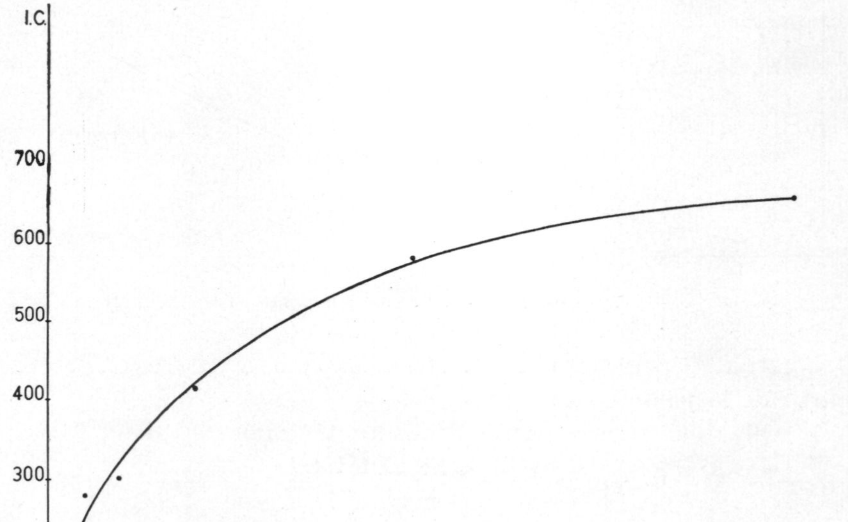
La comparaison a porté sur une paille de blé non fermentée et la même paille placée cinq mois à l'étuve à 65°, après addition de 5 mg d'urée par gramme de paille.

La perte de poids résultant de la fermentation a été de 35 p. 100.

Des échantillons de 2 g de paille fraîche et de la quantité correspondante (1,3 g) de paille fermentée ont été lavés sur filtre par ClH,N puis



COURBE 13. — Action de la poudre de mycelium d'*Aspergillus* sur la croissance de l'*Aspergillus*.



COURBE 14. — Action de l'extrait de mycelium d'*Aspergillus*.

à l'eau jusqu'à élimination complète de l'acide chlorhydrique. L'extraction a été effectuée ensuite sur filtre, par l'ammoniaque en solution normale.

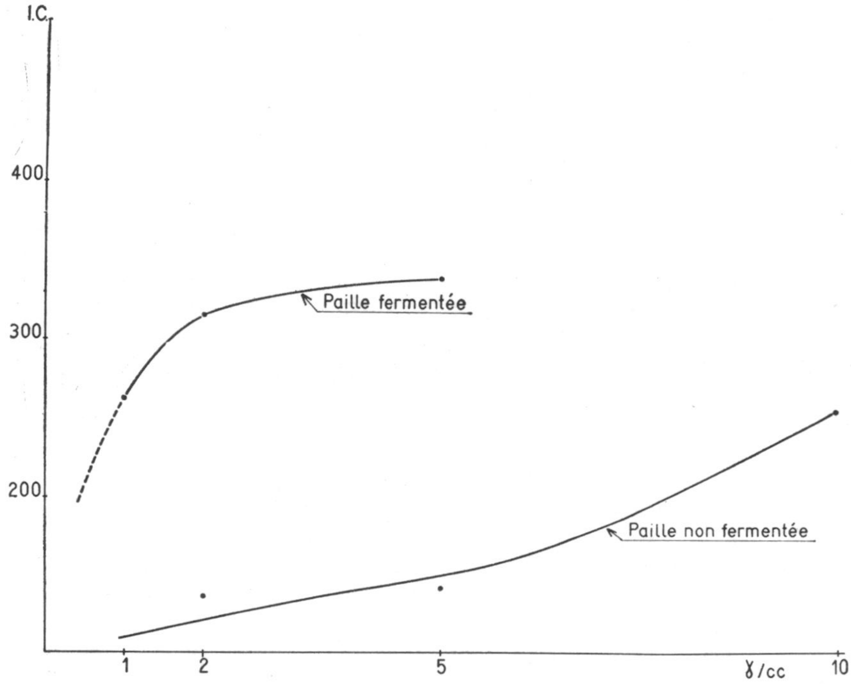
Les extraits ont été évaporés à sec, puis repris à l'eau ; le test *Aspergillus* a été réalisé sur la reprise aqueuse des extraits.

Les quantités extraites à l'ammoniaque, rapportées à 1 g de paille fraîche ont été les suivantes :

Paille fraîche, 50,9 mg.

Paille fermentée, 96,9 mg.

Les résultats du test *Aspergillus* sont représentés dans la courbe ci-contre (courbes 15).



Courbe 15. — Comparaison des extraits de paille fermentée et non fermentée.

L'extrait de paille fermentée est beaucoup plus actif que celui obtenu à partir de la paille fraîche.

L'évaluation approximative de l'activité totale des deux extraits représentée par le rapport : $\frac{\text{Extrait total}}{\text{conc. corr. à I. C. 200}}$ donne les chiffres suivants :

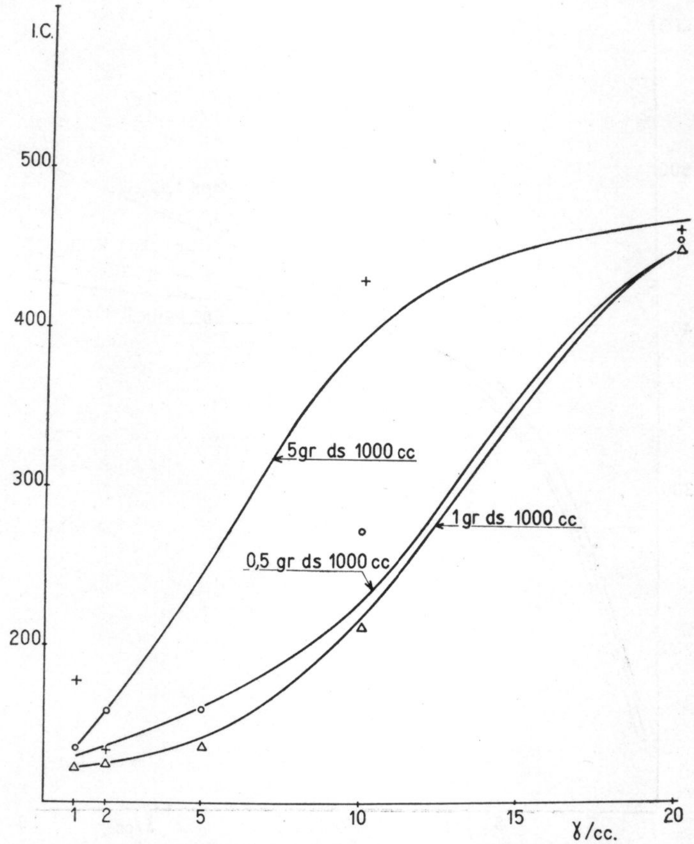
Paille non fermentée, $\frac{50{,}9}{8} = 6{,}36$

Paille fermentée, $\frac{96{,}9}{0{,}44} = 220.$

Malgré l'imprécision d'une telle évaluation, on peut conclure à une

très forte augmentation de l'activité totale des extraits, à la suite de la fermentation.

L'évaluation précédente n'est pas suffisante car elle suppose que la totalité des substances actives se retrouve dans l'extrait. Or l'expérience montre qu'une paille, même après une extraction très poussée, reste encore active sur l'*Aspergillus*. Pour cette raison l'expérience suivante a été réalisée:



COURBES 16. — Action des extraits de paille non fermentée, obtenus dans différentes conditions d'extraction.

Une paille fermentée et une paille non fermentée ont été extraites par l'eau à l'autoclave à 134° pendant 30 minutes.

Les proportions de paille et d'eau ont été de 5 g, 1 g et 0,5 g pour 1 000 cc d'eau.

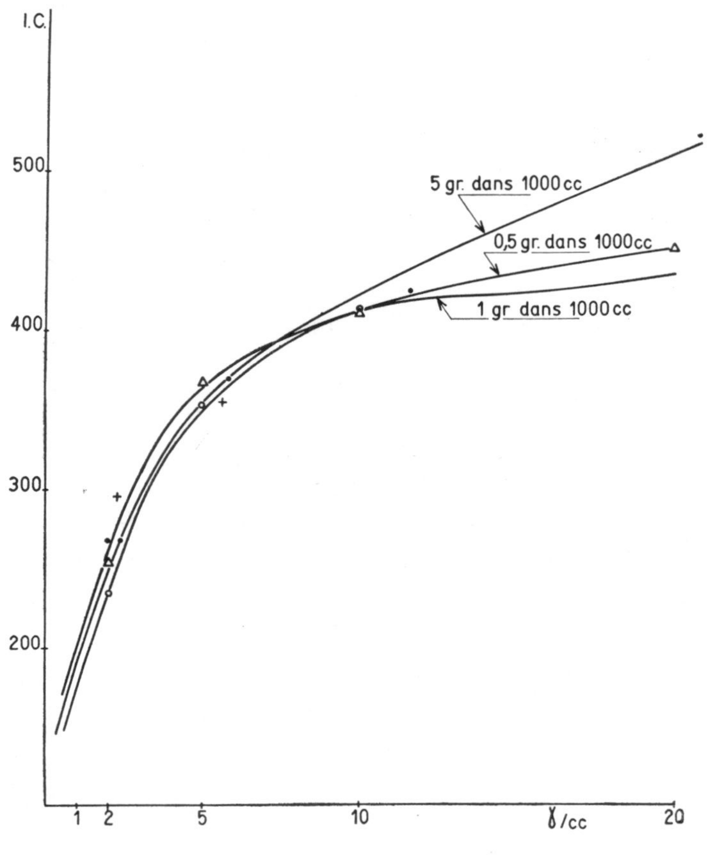
Les matières sèches extraites ont été les suivantes :

	Paille non fermentée	Paille fermentée
	—	—
5 g ds 1000 cc	114 mg par g	245
1 g —	140 —	324
0,5 g —	147 —	294

Le test *Aspergillus* a été effectué sur les extraits obtenus et sur les pailles épuisées.

Les résultats sont consignés dans les courbes ci-après (courbes 16-17-18).

Pour les pailles non fermentées, l'activité de l'extrait diminue



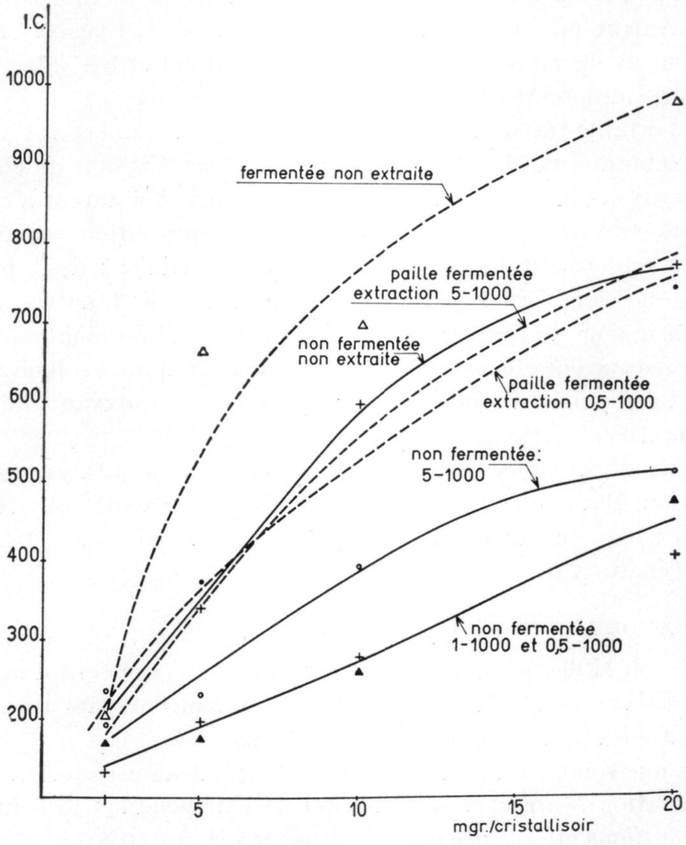
COURBES 17.
Action des extraits de paille fermentée obtenus dans différentes conditions d'extraction.

lorsque l'extraction est plus poussée. Pour les pailles fermentées cette activité reste sensiblement la même pour les trois extraits.

Les activités comparées appréciées comme précédemment donnent les évaluations suivantes par I. C. 300.

(Pour les pailles fermentées la quantité totale d'extrait a été déterminée pour la quantité de paille fermentée correspondant à 1 g de paille fraîche c'est-à-dire 0,65 g.)

	Paille non fermentée	Paille fermentée
Extractions 5 — 100	$\frac{114}{6,5} = 17,5$	$\frac{158}{3} = 52$
— 1 — 100	$\frac{140}{13} = 11$	$\frac{210}{3} = 70$
— 0,5 — 100	$\frac{147}{13} = 11,3$	$\frac{191}{3} = 64$



COURBES 18. — Action de pailles fermentées et non fermentées, après extraction à l'eau.

L'activité des pailles après extraction est estimée par l'inverse des quantités de paille correspondant à l'indice de comparaison 300.

	Paille non fermentée	Paille fermentée
Non épuisée	$\frac{1}{4} = 0,25$	$\frac{1}{2,5} = 0,4$
Après extraction 5 — 1000	$\frac{1}{6,5} = 0,15$	$\frac{1}{4} = 0,25$
— 1 — 1000	$\frac{1}{10} = 0,1$	—
— 0,5 — 1000	$\frac{1}{10} = 0,1$	—

Les conclusions rejoignent celles exposées précédemment ; aussi bien en ce qui concerne les extraits que les pailles avant ou après extraction, l'activité est plus élevée dans les pailles fermentées que non fermentées.

Recherches sur la nature des substances actives.

Nous avons vu à plusieurs reprises que diverses méthodes de séparation n'avaient pas permis d'isoler les substances actives sur l'*Aspergillus*. Nous avons émis l'hypothèse que l'activité était liée à la présence sur des corps différents d'une même fonction chimique.

D'importants travaux ont été réalisés dans ce domaine par W. FLAIG. et ses collaborateurs (8, 9, 10, 11, 12). Étudiant l'action de composés humiques sur la physiologie des plantes supérieures cet auteur a constaté que des substances organiques de synthèse, de composition parfaitement connue et renfermant la fonction Quinone possédaient des propriétés physiologiques semblables à celles des humus naturels. L'auteur a donné à ces corps le nom de « substances modèles ». Un certain nombre de substances de ce type ont été essayées : benzoquinone, naphtoquinone, anthraquinone. La thymohydroquinone et la 1-2-4-5-8 pentaoxyanthraquinone se sont montrées particulièrement actives.

D'après W. FLAIG ces substances agiraient comme catalyseurs d'oxydo-réduction. Il a montré notamment qu'elles stimulaient l'oxydation de l'acide ascorbique et du lactate de sodium par la tyrosinase et la lactodéshydrogénase (13).

ACTION DE L'HUMUS D'HYDROQUINONE.

Pour voir si des phénomènes de cet ordre intervenaient dans la stimulation de la croissance de l'*Aspergillus*, nous avons préparé une quinone par oxydation d'hydroquinone en milieu alcalin.

Dans une solution d'hydroquinone à 20 g/l alcalinisée par la soude à la concentration N/10 on a fait barboter de l'air pendant 48 heures.

La solution a été ensuite précipitée par SO_4H_2 à 10 p. 100 ; le précipité a été lavé et dialysé sur cellophane. Le produit obtenu, renferme des fonctions quinones formées par oxydation des fonctions phénol.

$$C_6H_4(OH)_2 + O \rightarrow C_6H_4O_2 + H_2O.$$

Toutefois la réaction s'accompagne de polymérisation et il n'est pas permis d'attribuer au corps une formule définie. D'après H. BRUSSET et P. CHARPIN (14) la composition élémentaire du produit obtenu par oxydation de l'hydroquinone en milieu sodique est la suivante :

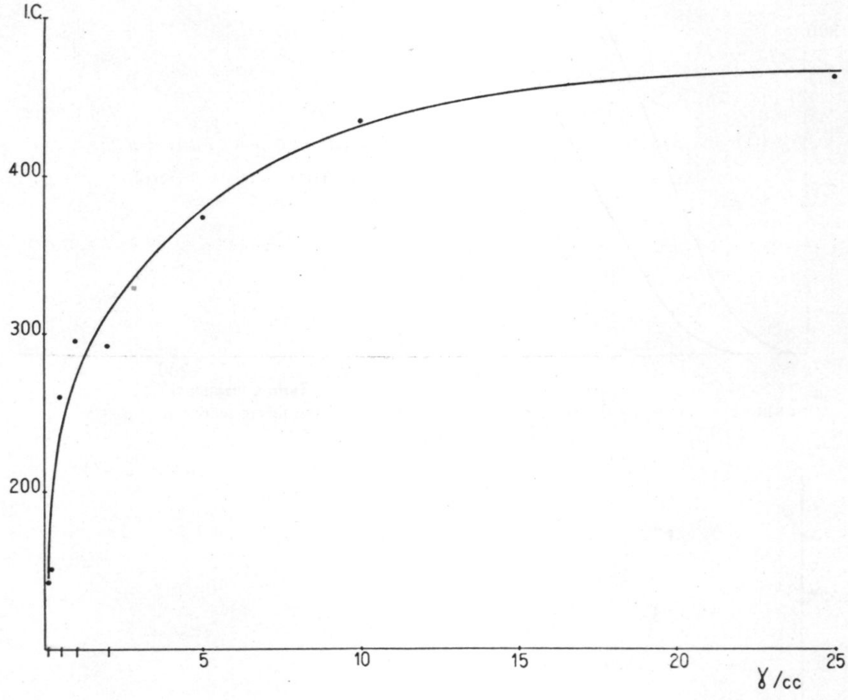
Moyenne de 3 déterminations

	%
C	57,28
H	3,91
O (par différence)	38,81

ce qui représente une richesse plus faible en carbone et plus élevée en oxygène que dans la quinone.

La suspension d'acide humique avait un pH initial de 2,6. Sa neutralisation à pH 7,0 nécessitait l'addition de 11,4 mg de NaOH pour 100 mg d'acide humique. La suspension neutralisée a été testée par l'*Aspergillus*. Les résultats des tests sont représentés par les courbes (19).

L'essai à doses croissantes d'humus d'hydroquinone montre que ce produit est déjà très actif à 0,5 γ/cc (I. C. 260).

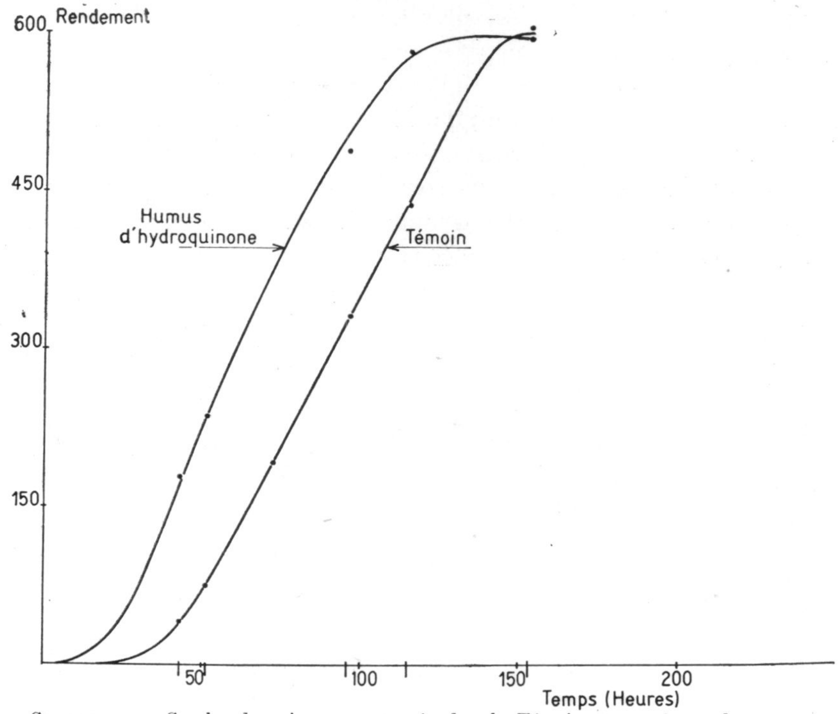


COURBES 19. — Action de l'humus d'Hydroquinone sur la croissance de l'*Aspergillus*.

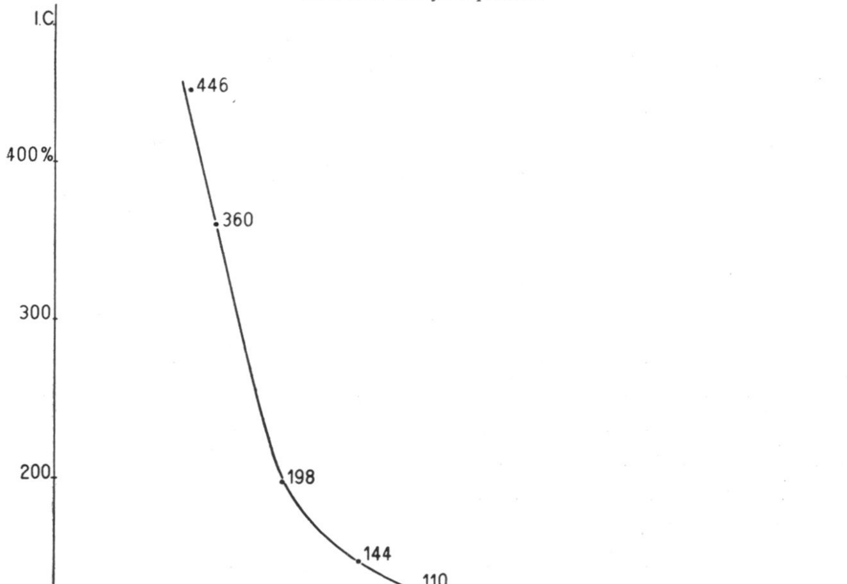
Les courbes de croissance (courbes 20) en fonction du temps confirment le fait déjà établi pour des humus naturels. Les différences relatives sont très élevées au début de la croissance. Elles s'atténuent ensuite, les rendements étant identiques après 150 heures de culture.

La courbe (21) montre la variation très régulière des I. C. en fonction du temps. Il est donc bien établi qu'un corps à fonction Quinone a sur l'*Aspergillus* une action stimulante analogue à celle de composés humifiés naturels ou d'extraits obtenus à partir de végétaux.

Ces faits apportent un argument en faveur de l'hypothèse d'après laquelle les composés actifs seraient des corps différents mais possédant une fonction organique commune : la fonction quinone. On conçoit que



COURBES 20. — Courbes de croissance comparées dans les Témoins et en présence de 5 γcc d'Humus d'Hydroquinone.



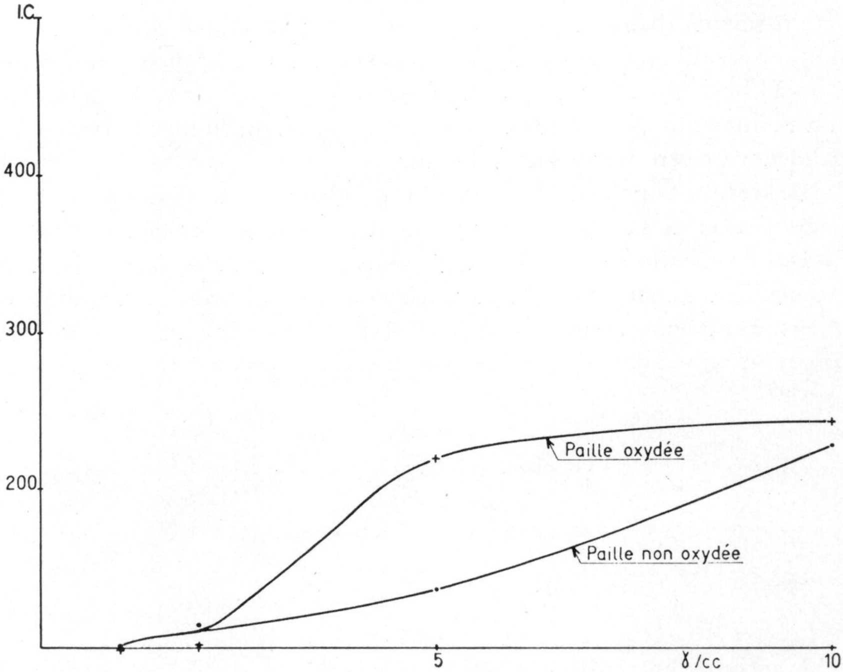
COURBES 21. — Variation en fonction du temps de l'Indice de comparaison des rendements dans les Témoins et en présence de 5 γcc d'Humus d'Hydroquinone.

parmi ces composés, certains puissent être dialysables ou non, précipitables ou non par les acides.

On sait que chez les végétaux existent de nombreux composés diphénoliques ortho et para susceptibles de donner, par oxydation, des fonctions quinone. Inversement les quinones, par réduction redonnent des fonctions phénol constituant ainsi des systèmes Redox. La présence de ces systèmes peut influencer le développement de l'*Aspergillus*. A. KEPES et M. LEMOIGNE (15) ont montré que, dans le cas du B. megatherium (aérobie strict) le potentiel d'oxydo-réduction du milieu partant de 0,450 V pour un pH : 6,8-6,5 s'abaissait rapidement, après la période de latence jusqu'à 0,190 V-0,135 V. Le barbottage d'oxygène pur dans le milieu, maintenant le potentiel à 0,500 V inhibait l'utilisation de l'azote nitrique et, par suite le développement du microbe.

OXYDATION DIRECTE DE COMPOSÉS VÉGÉTAUX.

La possibilité de formation de substances actives par oxydation directe de produits végétaux a été mise en évidence par l'expérience suivante :



COURBES 22. — Action d'extraits de paille témoin et de paille oxydée par $FeCl^3$.

Un échantillon de 2 g de paille non fermentée broyée a été oxydé par traitement à l'ébullition pendant 10 minutes, à l'aide de 50 cc d'une

solution de perchlorure de fer à 30° B. La paille a été ensuite lavée à l'eau, puis à l'acide chlorhydrique normal jusqu'à élimination du fer et enfin lavée à l'eau. Un traitement analogue, sauf l'oxydation au perchlorure a été réalisé sur un autre échantillon. Les deux échantillons ont été ensuite extraits par 200 cc d'ammoniaque en solution normale. Les extraits ont été amenés à sec, repris par l'eau et testés par l'*Aspergillus*.

Les matières sèches extraites par l'ammoniaque ont été les suivantes : (mg par g de paille).

Paille non oxydée : 50,5 mg.

Paille oxydée : 63,5 mg.

Les courbes (22) donnent le résultat du test.

L'activité globale des deux extraits évaluée par la méthode habituelle donne par I. C. 200 :

Paille non oxydée : $\frac{50,5}{8,6} = 5,9.$

Paille oxydée : $\frac{63,5}{4,2} = 15.$

L'oxydation de la paille a accru la quantité de substances extractibles à l'ammoniaque et l'activité de l'extrait.

On sait d'ailleurs depuis longtemps que, par simple contact de l'air en milieu alcalin, une paille donne naissance à des substances brunes analogues à l'humus. Ce fait a été particulièrement étudié par G. PICHARD (16) qui a montré que pour l'extraction de l'humus d'un fumier le traitement alcalin devait être fait à l'abri de l'air.

Les résultats précédents sont à rapprocher d'essais réalisés en vue de la destruction de la matière organique d'un terreau par l'eau oxygénée.

Des échantillons de 20 mg de terreau ont été traités par 10 cc d'eau oxygénée à des concentrations de 1 à 100 p. 100. Les terreaux traités ont été ensuite amenés à sec et testés à l'*Aspergillus* par addition directe du terreau au milieu de culture. Les résultats suivants ont été obtenus :

	I.C.
	—
Témoins	100
Terreau traité à l'eau pure	128
— H_2O_2 à 1 %	170
— 2 %	139
— 5 %	147
— 10 %	147
— 20 %	126
— 50 %	107
— 100 %	102

L'activité du terreau a été stimulée par le traitement à l'eau oxygénée à faibles concentrations. L'eau oxygénée concentrée, en détruisant complètement la matière organique fait perdre toute activité au terreau.

Dans la fermentation des substances végétales, les phénomènes d'oxydation jouent un rôle important. Sous l'action de phénoloxydases pro-

duites par les microorganiques des composés diphénoliques donnent naissance à des fonctions quinones. Ces réactions jouent vraisemblablement un rôle important dans l'accroissement de l'activité après fermentation, signalé plus haut.

RÉSUMÉ

La vitesse de croissance de l'*Aspergillus* est très largement accrue par l'addition au milieu de culture de petites quantités de substances organiques d'origine végétale. Cette action se manifeste soit par addition directe de poudres d'organes végétaux desséchés soit à partir d'extraits aqueux de ces organes.

Le poids de mycelium d'*Aspergillus*, obtenu après 48 heures de culture, peut être décuplé par rapport au témoin, à la suite de l'addition de ces substances au milieu de culture.

La comparaison de paille fermentée et non fermentée a montré que la fermentation augmente dans une large mesure l'activité qui se manifeste intensément pour les produits humiques résultant de la fermentation.

Un humus synthétique, obtenu par oxydation d'hydroquinone en milieu alcalin, présente une activité très marquée.

Ces faits conduisent à l'hypothèse que le mécanisme de l'activité est lié à la présence dans les produits actifs de corps à fonction quinone, constituant avec les diphénols dont ils dérivent des systèmes Redox qui interviendraient comme catalyseurs dans les réactions d'oxydo-réduction.

SUMMARY

The stimulating effect of organic substances on the growth of Aspergillus niger.

The growth rate of Aspergillus is greatly increased by additions of small amounts of organic matter of vegetable origin to the culture medium. This effet is obtained either by direct addition of powdered vegetal tissues or by application of aqueous extracts from these organs.

The weight of Aspergillus mycelia obtained after 48 hours of culture may be increased tenfold upon addition of these substances to the culture medium.

Comparison of decomposed and undecomposed straw showed that fermentation greatly increased the activity of straw, due to the humic matter produced during fermentation.

A synthetic humus, obtained by the oxidation of hydroquinone in alkaline medium, showed a very high activity.

Results suggest that the mechanism of this activity is associated with the presence of quinones in the active products, forming with diphenols (from which they derive) redox systems which participate as catalysts in the processes of oxidation and reduction.

ZUSAMMENFASSUNG

Stimulanswirkung organischer Substanzen auf das Wachstum von Espergillus Niger.

Die Zugabe von kleiner Mengen organischer Substanzen pflanzlicher Herkunft in das Kulturmedium vergrössert ansehlichts die Wachstumgeschwindigkeit von Aspergillus. Diese Wirkung offenbart sich bei direkter Zugabe von Pulver getrockneter pflanzlicher Organe oder Wasserextrakte der selben Organe.

In Bezugnahme auf nichtbehandelte Kulturen, erhält man nach 48 Stunden, durch Zugage solcher Substanzen in das Kulturmedium, eine Verzehnfachung des Gewichtes an Aspergillusmyzelium. Der Vergleich zwischen gegärtem und nicht gegärtem Stroh zeigt dass die durch Gärung erhaltenen Humusprodukte diese Aktivität im weitesten Masse fördert.

Ein synthetischer Humus, welcher durch Hydrochinon-Oxydation in alkalischem Medium erzeugt wurde, zeigte eine sehr starke Wirkung.

Disee Tatsachen führen zu der Annahme dass der Wirkungsmechanismus an die Anwesenheit von aktiven Stoffen mit Chinon-Funktion gebunden ist; dieselben bilden mit den zweiwertigen Phenole von denen sie herrühren, Redox-Systeme welche als Katalysatoren in die Oxydation-Reduktionsreaktionen eingreifen.

Стимулирующее действие органических веществ на рост Aspergillus Niger.

Р. ШАМИНАД (Версаль).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Скорость роста аспержиллюса очень сильно увеличена прибавлением к среде культуры маленьких количеств органических веществ растительного происхождения. Это действие выявляется при непосредственном прибавлении порошков из высушенных растительных органов, или же отправляясь от водных вытяжек этих органов.

Вследствие прибавления этих веществ к среде культуры, вес грибницы аспержиллюса, полученный после 48 часов культуры, может увеличиться в десять раз.

Сравнение соломы разложившейся и неразложившейся показало, что ферментация соломы увеличивает активность в широкой степени; эта активность выявляется интенсивно в случае гумусовых продуктов образовавшихся при ферментации.

Синтетический гумус, полученный окислением гидрохинона в щелочной среде, обнаруживает действие очень заметное.

Эти факты приводят к гипотезе, что механизм действия находится в зависимости от присутствия в действующих продуктах ядер содержащих функцию хинон (quinone), которые составляют с дифенолами, из которых они образовались, системы Redox, которые повидимому участвуют как катализаторы в окислительно-восстановительных реакциях.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) CHAMINADE (R.). — Réaction de l'Aspergillus Niger aux substances de croissance présentes dans la matière organique humifiée. *C. R. Acad. Sc.*, **239**, p. 1844, 1954. — *Ann. Agr.*, **3**, p. 363, 1955.

(2) CHAMINADE (R.) et BLANCHET (R.). — Action de l'humus colloïdal sur la nutrition minérale des végétaux. *C. R. Acad. Sc.*, **233**, p. 1486, 1951.

(3) CHAMINADE (R.) et BLANCHET (R.). — Influence de l'Humus sur la nutrition minérale de la plante dans le sol. *C. R. Acad. Sc.*, **234**, p. 878, 1952.

(4) CHAMINADE (R.) et BLANCHET (R.). — Mécanisme de l'action stimulante de l'Humus sur la nutrition minérale des végétaux. *C. R. Acad. Sc.*, **237**, p. 1768, 1953.

(5) CHAMINADE (R.). — Recherches sur le rôle de la matière organique dans la fertilité des sols. *Ann. Agr.* **1**, p. 95, 1952 ; **3**, p. 399, 1953.

(6) CHAMINADE (R.). — Action de l'acide humique sur le développement et la nutrition minérale des végétaux. *C. R.* 6e *Congrès Int. de la Science du Sol*, **13**, p. 443, 1956.

(7) NICHOLAS (D. H.). — Some aspects of the use of fungi as Test organisms for determining Mg and trace metals in soils and plants. *Trans. of joint meeting Comm. II and IV of Int. Soc. of Soil Sc.*, **2**, p. 158, 1952.

(8) FLAIG (W.). — Zur chemie der Huminsäuren und deren Modell substanzen *C. R.* 6e *Cong. Int. de la Sc. du Sol*, **13**, p. 471, 1956.

(9) FLAIG (W.). — Breiträge zur chemie der Modell substanzen von Huminsäuren. *Land. Forsch.*, **6**, p. 94, 1955.

(10) FLAIG (W.). Chinone als Modell substanzen von Huminsäuren. *Zeits. für Pflanz, Dung, Nodenk.*, **63**, p. 43, 1955.

(11) FLAIG (W.) und SAALBACH (E.). — Zur Kenntnis der Huminsauren. XI. Mitteilung. Die Beeinflussung der Keimung von Getreide durch Thymohydrochinon als Modellsubstanz von Vorstufen bzw. Abbauprodukten von Huminsäuren. *Zeits. für Pflanz, Dung. Bodenk.*, **71**, p. 215, 1955.

(12) FLAIG (W.), SCHARRER (K.) und SCHOLL (G.). — Zur Kenntnis der Huminsäuren. XV. Mitteilung Uber der Einfluss von Thymohydrochinon als Modell substanz von Humusstoffen auf den Kohlenhydratstoff wechsel von Getreide. *Zeits f. Pflanz. Dung. Bodenk.*, **76**, p. 193, 1947.

(13) FLAIG (W.) und REINEMUND (K.). — Zur Kenntnis der Huminsäuren. VI Mitteilung. Studien zur Beschleunigung von Dehydrierungs reaktionen durch Modell substanzen von Huminsäuren vorstufen bzw. abbauprodukten. *Zeits. f. Pflanz, Dung. Bodenk.*, **68**, p. 225, 1955.

(14) BRUSSET (H.) et CHARPIN (P.). — Oxydation des polyphénols en milieu ammoniacal. *C. R. Acad. Sc.*, **240**, p. 2315, 1955.

(15) KEPES (A.) et LEMOIGNE (M. — Action inhibitrice de l'oxygène sur l'utilisation de l'azote nitrique par un bacille aérobie et valeur du potentiel d'oxydo — réduction. *C. R. Acad. Sc.*, **226**, p. 1556, 1948.

(16) PICHARD (G.). — Méthode de séparation et de dosage des principes immédiats contenus dans les tissus lignifiés et dans leurs produits de décomposition. *Ann. Agr.*, **4**, p. 505, 1931.

633. 11 : 631. 46 : 581. 144. 2

ÉTUDE DE LA RHIZOSPHÈRE DU BLÉ

PAR

J. RIVIÈRE

Laboratoire de Recherches de la Chaire de Microbiologie.
Institut National Agronomique, Paris.

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

I. — Historique.
II. — Orientation des recherches personnelles.

A. — Étude microbiologique de la rhizosphère à divers stades de la croissance du Blé.

I. — Matériel et méthodes.
1° Conditions expérimentales.
2° Techniques microbiologiques employées.

II. — Résultats et discussion.

B. — Étude des excrétions radicellaires du Blé à la fin du tallage.

I. — Matériel et Méthodes.
1° Culture aseptique.
2° Rhizosphère artificielle.

II. — Résultats et discussion.

III. — Étude biochimique des excrétions radicellaires du Blé.
1° Techniques employées.
2° Résultats et discussion.

Conclusions.

Résumé.

Références bibliographiques.

INTRODUCTION

I. — Historique

Les interrelations entre les plantes et le sol sont des notions très anciennes puisque PLINE parle déjà de l'action fertilisante des Légumineuses. Cependant c'est en 1904 seulement que HILTNER (1) le premier définit la rhizosphère comme la région du sol où s'exerce l'action spécifique des racines. A partir de cette époque les observations et les recherches relatives aux actions provoquées par les racines des plantes supérieures vont se multiplier, et nous pouvons, en résumant de façon schématique, dire que l'étude de la rhizosphère s'est faite en considérant le problème sous deux aspects différents.

1. — Les plantes déterminent au voisinage de leurs racines un effet rhizosphère qui se manifeste par des modifications dans la microflore du sol.

2. — Les micro-organismes de la rhizosphère ont une action sur la croissance de ces mêmes plantes.

C'est le premier aspect qui est envisagé dans ce mémoire.

Peut-on faire le point des nombreux travaux consacrés à la rhizosphère malgré l'emploi de techniques différentes amenant des résultats contradictoires ou des interprétations diverses? C'est assez difficile, cependant les auteurs s'accordent sur un certain nombre de faits.

L'examen microscopique (2, 3, 4) montre autour des racines une grande quantité de micro-organismes dont la densité va en diminuant au fur et à mesure que l'on s'éloigne d'elles. Quand on mesure le dégagement de gaz carbonique (7) ou que l'on dénombre la microflore totale (10, 11, 12, 13), on s'aperçoit que l'effet rhizosphère est plus important au voisinage des racines, ce qui permet de distinguer (10, 12, 14, 15) la *rhizosphère proche* qui est la couche de terre au contact des racines, et la *rhizosphère éloignée* qui s'étend jusqu'à une distance d'environ 0,5 cm. Cet effet global est généralement stimulant et se définit au moyen du rapport R/S [1].

Une analyse plus détaillée montre que cet effet rhizosphère global est en relation avec des facteurs multiples : l'espèce botanique ou la variété de la plante en culture (5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19), le type de sol (16, 22, 23) et la richesse du sol en substances nutritives, humus, engrais organiques ou minéraux (12, 19, 24, 25) ; le facteur le plus intéressant est l'âge du végétal (12, 19), l'effet maximum apparaissant lorsque la plante atteint une dimension importante, habituellement lors de la floraison, bien que TIMONIN (10) signale avoir observé une action élevée peu de temps après la germination.

[1] R/S = nombre de micro-organismes dans la terre de la rhizosphère (R) divisé par le nombre de micro-organismes dans le sol prélevé à une certaine distance ou sol témoin (S).

On se demande si c'est toute la microflore qui subit l'effet rhizosphère, ou bien si les stimulations (et éventuellement les inhibitions) sont sélectives ?

La plupart des résultats ont trait à la microflore bactérienne, car on sait peu de choses sur l'action des racines vis-à-vis des Algues (12) ou des Protozoaires (12, 26). Quant aux Champignons, les conclusions d'un petit nombre de travaux (16, 27, 28, 29, 30) semblent indiquer une action sélective des racines sur la microflore fungique, mais l'interprétation est difficile par suite de la complexité des relations entre la rhizosphère, les traitements du sol et les agents responsables de la pourriture des racines des variétés sensibles. On peut classer en trois groupes les travaux consacrés aux Bactéries de la rhizosphère et résumer rapidement leurs conclusions.

1° Groupes morphologiques.

Les Bactéries Gram négatives, à morphologie simple, prédominent dans la rhizosphère ou sont relativement plus abondantes que dans le sol éloigné, alors que les sporulées font l'inverse (14, 23, 24, 31). Mais rien ne permet de préciser la présence d'espèces typiques dans chaque rhizosphère, d'autant plus que les auteurs n'utilisent pas les mêmes modes de classement morphologique des genres et des familles, ni les mêmes méthodes d'isolement et de culture.

2° Groupes physiologiques.

Si l'on envisage les grands groupes physiologiques responsables des cycles de l'azote et du carbone dont le rôle dans la vie du sol a été surtout mis en évidence par WINOGRADSKY (32), on arrive à la conclusion que cette question, la plus importante du point de vue agronomique, est malheureusement la moins étudiée. Des travaux anciens font état de l'augmentation d'activité, par rapport au sol témoin, de presque tous ces groupements (fixation d'azote, ammonification, nitrification, cellulolyse), mais les résultats sont fragmentaires et difficilement comparables. Ainsi, dans le cas de la fixation de l'azote, on trouve en proportion sensiblement équivalente les trois opinions suivantes : stimulation (15, 33), inhibition (15, 34) ou pas de modification (12, 23). Dans le cas du Blé DASTE (15) observe l'alternance de phases d'inhibition et de stimulation suivant les stades de la croissance de la plante. Avec les autres groupes, les conclusions sont aussi variées selon les auteurs (12, 13, 14, 15, 17, 18, 21, 26).

3° Groupes nutritionnels.

C'est l'étude la plus complète. L'école canadienne avec LOCHHEAD et ses collaborateurs (14, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43) a effectué un grand travail d'ensemble en partant du fait qu'il était indispensable de

connaître les besoins nutritionnels des Bactéries de la rhizosphère pour comprendre les relations entre les racines et la microflore du sol.

Le principe de leur méthode est le suivant : ils isolent un grand nombre de souches sur un milieu non sélectif où presque tous les groupes peuvent se développer, puis ils ensemencent chacune des souches ainsi isolées dans toute une gamme de milieux de complexité croissante, permettant de répartir les Bactéries en sept groupes, dont trois principaux : celles qui ont une croissance normale dans un milieu simple (sels minéraux + glucose), celles qui nécessitent des acides aminés et celles qui nécessitent des facteurs de croissance (surtout des vitamines du groupe B). Les conclusions auxquelles ils aboutissent sont les suivantes :

Dans la rhizosphère de toutes les plantes étudiées, on note une augmentation relative du nombre des Bactéries ayant besoin d'acides aminés (surtout méthionine, cystéine et taurine) et une diminution, également relative, de celles nécessitant des facteurs de croissance. Ces différences pouvant être ramenées à deux causes essentielles, la première étant une excrétion d'acides aminés par les racines, la seconde due à des interactions de micro-organismes entre eux, les Bactéries à pouvoir de synthèse élevé pouvant exercer une action synergique ou antagoniste vis-à-vis des autres. Les facteurs d'origine végétale ont alors été étudiés de plus près.

En effet, ce sont essentiellement des substances chimiques mises à la disposition des micro-organismes qui interviennent. Les substances minérales excrétées (44, 45) ont certainement une importance minime par rapport à celle des substances organiques. Celles-ci sont-elles excrétées par les racines, ou proviennent-elles des cellules desquamées (en particulier des poils absorbants) ?

Les avis diffèrent (46, 47, 48, 49). ROVIRA (50, 51, 52) qui fait une étude assez poussée de la question pense que, lorsque les plantes croissent, les véritables excrétions radicellaires sont probablement moins importantes que le matériel desquamé vis-à-vis de la population microbienne de la rhizosphère.

Il est impossible de citer toutes les substances organiques dont plusieurs dizaines de travaux ont démontré l'excrétion par de nombreuses plantes : des acides aminés (51, 53, 54, 55), des nucléotides (56, 57), des oses (51, 58, 59), des acides organiques (59, 60), des facteurs de croissance (61, 62), et des enzymes (53, 63). Ce qui est intéressant, c'est de préciser le rôle de ces substances. Quelques actions bactériostatiques ont été signalées (15, 47), mais les actions stimulantes sont les plus importantes et elles ont été mises en évidence avec des techniques variées : substances détectées dans le sol rhizosphère (53), après excision des racines (57, 60), dans des cultures aseptiques sur sable (50, 51) dans des cultures aseptiques en milieu liquide (64) ; mais peu d'exemples concrets

permettent de déterminer les produits excrétés responsables d'un effet rhizosphère donné. TIMONIN (65) signale un cas frappant : il étudie deux variétés de Lin, dont l'une (Bison) est résistante à *Fusarium lini*, alors que l'autre (Novelty) est sensible. Il cultive aseptiquement ces deux variétés, recueille leurs extraits radicellaires, les introduit dans des sacs de collodion enfouis dans la terre (réalisant des racines artificielles). Avec la variété résistante, il observe une raréfaction des Champignons pathogènes *(Fusarium)* et une stimulation de *Trichoderma viride*, antagoniste, qui produit un antibiotique actif, la viridine. La substance responsable inhibitrice est un glucoside (linamarine) dont l'hydrolyse donne de l'acide cyanhydrique.

En effet, s'il répète l'expérience avec du cyanure de potassium à la place des excrétions radicellaires, les résultats sont identiques. C'est malheureusement la seule expérience précise, et la conclusion que l'on peut tirer de cette rapide revue bibliographique est la suivante : si les études sont assez nombreuses, une grande diversité de techniques, des interprétations diverses de résultats peu nets, voire contradictoires, ne permettent pas d'avoir une idée claire de l'effet rhizosphère. Souvent les conditions expérimentales sont mal définies, certains auteurs ayant même négligé la comparaison avec un témoin convenablement choisi, la valeur statistique des résultats n'étant pas même discutée.

II. — Orientation des recherches personnelles.

L'évolution des techniques et la mise au point de nouvelles méthodes par l'école française de microbiologie du sol (66) ont rendu possible une expérimentation nouvelle permettant de faire le point : il s'agissait d'étudier l'*effet rhizosphère proche et éloignée* d'une plante donnée, à divers stades de sa croissance, non seulement sur les groupes morphologiques classiques de micro-organismes du sol (Bactéries, Actinomycètes et Champignons), mais aussi sur certains groupes physiologiques responsables d'une fonction définie dans le sol.

— Dans le cycle de l'azote, les fixateurs aérobies et anaérobies, les ammonifiants, les nitrificateurs et les dénitrifiants.

— Dans le cycle du carbone, les cellulolytiques aérobies et les amylolytiques.

Les raisons qui présidèrent au choix du Blé sont les suivantes :

1. — L'analyse critique bibliographique faisait apparaître un tel désaccord qu'il était tentant de reprendre les études antérieures avec des techniques plus appropriées.

2. — La culture d'un Blé de printemps est facile et la durée de sa végétation relativement courte.

3. — Il y a de nombreuses variétés bien définies que l'on peut se procurer aisément.

Nous avons divisé ce mémoire en deux parties, la première situant le phénomène (*Étude microbiologique de la rhizosphère à divers stades de la croissance du Blé*), la seconde essayant de l'expliquer (*Étude des excrétions radicellaires du Blé à la fin du tallage*).

A. — ÉTUDE MICROBIOLOGIQUE DE LA RHIZOSPHÈRE A DIVERS STADES DE LA CROISSANCE DU BLÉ

I. — Matériel et méthodes.

1° Conditions expérimentales.

Nous n'avons malheureusement pas la place d'analyser les principaux travaux cités dans la bibliographie, ce qui eût été fort instructif, car ils nous ont permis, dans une large mesure, de déterminer un certain nombre de conditions indispensables pour faire une expérimentation correcte. Elles proscrivent les cultures en champ et aboutissent au protocole expérimental adopté, dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

— Cultures en pot dans une terre tenue en jachère sarclée.

— Une moitié des pots est semée à raison de trois grains par pot, afin d'avoir rapidement une assez grande quantité de racines par rapport à la terre contenue dans le pot, pour accentuer les modifications de la microflore dues à l'effet rhizosphère.

— L'autre moitié des pots sert de témoin.

— L'humidité est maintenue égale dans les différents pots au cours de la culture qui se fait sur une terrasse bien exposée. Les variations des conditions atmosphériques ont été relevées à l'observatoire de Montsouris (82).

Les variétés de Blé choisies sont *Fylgia* et *Blé d'Avril*.

Nous avons utilisé de la terre bien homogénéisée après ressuyage provenant de deux sols, dont l'analyse physique, chimique et bactériologique, conformément aux techniques décrites par DEMOLON (67) et POCHON (66), est résumée dans le tableau I.

a) PRÉLÈVEMENTS DES ESSAIS EN VUE DE L'ANALYSE

La technique est la suivante (toutes les opérations étant réalisées en prenant les précautions d'asepsie habituelle) : quarante-huit heures avant de faire les analyses, les pots semés et les pots témoins sont portés dans une pièce fraîche, non arrosés, afin d'obtenir une humidité convenable et à peu près constante pour avoir des prélèvements de rhizosphère

Tableau I

Caractéristiques physiques, chimiques et microbiologiques des deux sols utilisés dans l'expérimentation.

1° Analyse physique	Limon argileux	Rendzine argilo-calcaire
Sable grossier : %	3,7	7,8
Sable fin : %	46,4	9,4
Limon : %	18,45	8,20
Argile : %	17,05	37,80
Calcaire (CO^3Ca) : %	1,52	25,80
Matières organiques : %	2,60	3,10
Colloïdes humiques : %	1,1	—
2° Analyse chimique :		
pH	7,5	7,6
Azote : ‰	1,40	1,79
Carbone : ‰	12,6	16,1
C/N	9	8,9
Acide phosphorique : ‰	0,13	0,15
K^2O : ‰	0,06	0,24
Milliéquivalents par kg de terre	1,3	5,1
MgO : ‰	0,14	0,43
Milliéquivalents par kg de terre	7	21,5
CaO : ‰	4,68	11,59
Milliéquivalents par kg de terre	167	414
3° Analyse microbiologique :		
Champignons :		
— ordre de grandeur	25 000/g	50 000/g
Actinomycètes :		
— ordre de grandeur	250 000/g	1 000 000/g
Microflore totale :		
— ordre de grandeur	10 000 000/g	50 000 000/g
Microflore fixatrice d'azote :		
Aérobiose : terre moulée (colonies apparues)	++++ (> 100 colonies)	++ (< 100 colonies)
(1) SiG pyruvate	96 %	48 %
Anaérobiose : terre moulée (colonies apparues)	+++ (100 colonies env.)	+++
(1) SiG glucose	68 %	50 %
Microflore ammonifiante :		
Milieu liquide : disparition de la tyrosine :		
— dilution maximum au 5e j.	10^{-3}	10^{-5}
— dilution maximum au 10e j.	10^{-5}	10^{-6}
Microflore nitreuse :		
(1) SiG émaillé	64 %	60 %
Milieu liquide : dilution maximum au 15e j avec apparition de nitrites	10^{-2}	10^{-3}
Microflore nitrique :		
(1) SiG émaillé	54 %	58 %
Milieu liquide : dilution maximum au 15e j avec apparition de nitrates	10^{-2}	10^{-3}
Microflore dénitrifiante :		
Milieu liquide : disparition des nitrates :		
— dilution maximum au 5e j.	10^{-3}	10^{-5}
— dilution maximum au 10e j.	10^{-5}	10^{-6}
Microflore cellulolytique :		
Aérobie :		
(1) SiG cellulose	21 %	46 %
Anaérobie :		
Mésophiles	0	0
Thermophiles	+ après 8 jours	0
Microflore amylolytique :		
Gélose à l'amidon (colonies apparues)	+++	+++
Milieu liquide : disparition de l'amidon :		
— dilution maximum au 5e j	10^{-4}	10^{-6}

TABLEAU I (Suite)

3° Analyse microbiologique	Limon argileux	Rendzine argilo-calcaire
Microflore sulfato-réductrice :		
Milieu liquide : 1 g	5 tubes positifs	5 tubes positifs
10^{-1}	0	0
Microflore oxydant le soufre :		
(1) SiG émaillé	16 %	42 %
Microflore oxydant le soufre réduit :		
(1) SiG émaillé	24 %	24 %
Algues	0	0

(1) En abréviation SiG pyruvate (glucose ou cellulose) indique qu'il s'agit de silico-gel imprégné avec la solution standard de WINOGRADSKY (32) additionnée de pyruvate (de glucose ou de cellulose) ; dans le cas de SiG émaillé, il s'agit de silico-gel imprégné suivant les besoins de la microflore étudiée et émaillé avec du carbonate de calcium qui permet l'observation des auréoles de dissolution dues aux acides minéraux formés. Les résultats sont exprimés en pourcentage de grains fertiles (les ensemencements ayant été faits avec des grains de terre).

identiques (en fait l'humidité dans ces conditions varie de 8 à 15 p. 100 dans les cas extrêmes, avec une moyenne de 10 p. 100 environ) (1).

Les différents prélèvements se font de la façon suivante :

POTS SEMÉS.

Les plantes sont enlevées avec précaution sans briser les racines pour conserver tout le chevelu radicellaire. On obtient ce résultat en décollant le bloc de terre à l'aide d'une spatule et en l'émiettant soigneusement sans léser le système radicellaire, puis en secouant légèrement les racines pour éliminer la terre qui n'adhère pas.

Caractérisation de la rhizosphère éloignée.

Toute la terre contenue dans le pot est passée par le tamis n° 2 (2) pour retenir les graviers, recueillie dans un mortier stérile et mélangée. On prélève de petites fractions (une vingtaine environ) prises au hasard à partir desquelles 5 grammes seront pesés, ce qui représente la *rhizosphère éloignée*. Etant donné la proportion importante du système radicellaire par rapport au contenu de chaque pot, on peut estimer en première approximation que tous les grains de terre sont à une distance des racines inférieure à 0,5 cm. Ces 5 grammes sont soigneusement broyés dans un mortier avec 45 millilitres d'eau ajoutés en plusieurs fois, puis recueillis dans une fiole Erlenmeyer de 250 millilitres agitée vingt-cinq fois avant de faire les dilutions. Ceci représente une dilution de la *rhizosphère éloignée* que l'on calcule après avoir fait l'extrait sec à 100°C sur une partie aliquote (voir fig. 2, pl. II).

(1) La température est inférieure à 15°C et le degré hygrométrique compris entre 40 et 60 p. 100.

(2) Les ouvertures des mailles des tamis PROLABO utilisés sont les suivantes : 2 millimètres. Module AFNOR 33.

Caractérisation de la rhizosphère proche.

Après avoir coupé les tiges juste au-dessus du plateau de tallage, les racines sont recueillies soigneusement (avec leur chevelu radicellaire) dans un mortier, débarrassées de la terre qu'elles retiennent par adhérence et lavées dans une fiole Erlenmeyer contenant 45 millilitres d'eau stérile, de la façon suivante :

— Cinq minutes sans agiter, puis cinq minutes en agitant dix fois par minute, en changeant de sens chaque fois et en faisant de larges mouvements de brassage circulaire. Le contenu de la fiole est remis dans le mortier contenant la terre qui était adhérente aux racines et l'on broie comme précédemment après avoir ajouté l'eau de rinçage. Ceci constitue une dilution de la *rhizosphère proche* que l'on calcule comme dans le cas de la *rhizosphère éloignée*.

POTS TÉMOINS.

Ils sont traités exactement comme la *rhizosphère éloignée* : enlever la terre, l'émietter, la tamiser, peser 5 grammes que l'on broie avec 45 millilitres d'eau, et déterminer l'extrait sec à 100°C pour calculer la dilution exacte.

b) PRÉPARATION DES DILUTIONS

A partir de ces échantillons, il est possible de faire des dilutions jusqu'au 1/100 000 000 (de 10^{-1} à 10^{-8}). Pour ce faire, une technique rigoureuse est indispensable : afin de préparer une série de fioles Erlenmeyer de 250 millilitres contenant 45 millilitres d'eau stérile, il est nécessaire d'employer de l'eau de source ou de puits, non distillée, ne contenant rigoureusement aucune trace d'antiseptiques auxquels les micro-organismes du sol, tout au moins certains d'entre eux, peuvent être très sensibles, et stérilisée à l'autoclave vingt minutes à 120°C.

Avec une pipette de 10 millilitres stérile, on prélève 5 millilitres de la première dilution en homogénéisant bien la suspension (aspirer et rejeter trois fois le contenu de la pipette) et on les porte dans une deuxième fiole. On transfère à l'aide d'une nouvelle pipette 5 millilitres de cette deuxième fiole dans une troisième, etc., en prenant les mêmes précautions d'homogénéisation des suspensions à chaque transfert et en changeant de pipette à chaque dilution [1].

c) CONDUITE DES ANALYSES

Elles ont consisté à étudier à quatre stades de la croissance du Blé (germination, tallage, épiaison et maturité), l'effet rhizosphère sur les

[1] Dans ces conditions, le volume obtenu est suffisant pour permettre l'ensemencement des divers milieux de culture qui doit se faire immédiatement.

principaux groupes morphologiques et physiologiques de micro-organismes du sol, en séparant l'*effet rhizosphère proche* de l'*effet rhizosphère éloignée.*

2° Techniques microbiologiques employées.

Elles diffèrent suivant les groupes de micro-organismes étudiés, sont adaptées à leur physiologie propre, et sont très voisines, sinon identiques, à celles décrites dans l'ouvrage de Pochon (66). Elles se ramènent à deux types principaux :

1. — Dénombrer par culture après dilutions et ensemencements :

— Soit à la surface de milieux gélosés. Après incubation, on compte le nombre de colonies apparues et on ramène les résultats à 1 g de terre en poids sec. C'est ce que l'on fait dans le cas de la microflore totale, des Actinomycètes et des Champignons.

— Soit à la surface de plaques de silico-gel convenablement imprégnées. On compte aussi le nombre des colonies apparues après incubation : microflore cellulolytique aérobie et microflore anaérobie fixatrice d'azote.

— Soit dans des milieux liquides sélectifs après avoir ensemencé plusieurs tubes par dilution. A l'aide du calcul statistique (68), on détermine le nombre moyen probable des micro-organismes préexistant dans l'échantillon après avoir observé une modification caractéristique du milieu due à leur croissance. C'est ce qui se fait dans le cas de la microflore aérobie fixatrice d'azote et des nitrificateurs.

2. — Suivre l'évolution de l'action d'un groupe physiologique (ammonification, dénitrification, amylolyse) en fonction des dilutions et du temps. On ensemence plusieurs tubes par dilution d'un milieu contenant un substrat donné (tyrosine, nitrates ou amidon) sensible à l'action du groupe étudié, et chaque jour on détermine la dilution limite dans laquelle le substrat a disparu, après l'avoir recherché par une réaction spécifique. On trace alors la courbe caractéristique : en abscisses, les temps (en j.), en ordonnées, la dilution la plus forte où le substrat a disparu. L'effet rhizosphère, par rapport au témoin, est exprimé par la différence des dilutions limites le dernier jour.

D'après Pochon (66), ces méthodes sont fidèles, d'interprétation aisée, et d'une bonne valeur comparative.

II. — Résultats et discussion.

1° Dans une première série d'expériences réalisées en 1956 et en 1957, l'étude a porté sur *l'effet rhizosphère proche et éloignée* de la variété *Fylgia* semée dans un limon argileux, à divers stades de la croissance de la plante.

— *Germination* : en fait, huit jours après son début, afin de pouvoir déceler l'effet rhizosphère s'il y en a un.

— *Tallage* : il s'agit de la fin du tallage, du début de la montée.

— *Épiaison* : correspondant à la floraison.

— *Maturité* : en réalité ce stade est plus tardif, car il doit permettre de voir s'il y a un effet rhizosphère après le flétrissement et la mort de la plante.

Avant de résumer les résultats et d'en tirer des conclusions, il est nécessaire, au préalable, d'apprécier la valeur des diverses techniques employées.

Il est évident que, comparé à une culture en pleine terre, le pot réalise un effet rhizosphère élevé par suite d'une quantité importante de racines par rapport à un assez faible volume de terre, ce qui permet de séparer les effets rhizosphère des variations dues à l'hétérogénéité du sol lui-même.

Dans les cultures en pleine terre, l'étude quantitative de la rhizosphère est rendue impossible actuellement pour deux raisons : d'une part les racines vont à une profondeur telle qu'un prélèvement correct présente des difficultés insurmontables dans le cas d'un essai microbiologique, d'autre part l'étude statistique n'ayant jamais été faite, on ignore les écarts entre les nombres moyens probables qui sont certainement beaucoup plus élevés que certains rapports R/S cités dans la littérature. Car dans l'analyse microbiologique d'un sol, le problème du prélèvement est extrêmement complexe, et les variations d'un point à un autre sont beaucoup plus importantes que les variations des nombres moyens probables d'échantillons provenant de terres différentes : une communication de SAPPA (70) ayant trait à la mycoflore du sol montre les difficultés auxquelles se heurtent les méthodes statistiques lors de l'échantillonnage.

En plus de la nécessité de faire la culture dans des pots, il est indispensable d'employer une terre tenue en jachère nue depuis plusieurs années, afin d'éviter les débris de végétaux plus ou moins métabolisés, les particules d'engrais ou de fumier, autour desquels se développent des micro-colonies pratiquement impossibles à dissocier et donnant des variations considérables dans les résultats obtenus : cette terre doit être, après ressuyage, tamisée finement et soigneusement mélangée avant la répartition dans les pots. Lors des analyses, il faut homogénéiser le contenu de chaque essai et faire de nombreux prélèvements au hasard (au moins une vingtaine) à partir desquels une quantité déterminée sera pesée et ensuite diluée. Dans ces conditions, on peut estimer que les micro-organismes sont distribués au hasard dans les divers échantillons, et interprèter les tables de COCHRAN citées dans l'excellente mise au point de STEARMAN (69) sur les méthodes statistiques en microbiologie : les limites entre lesquelles varient les nombres moyens probables sont de

0,33 et 3,30, c'est-à-dire qu'un rapport R/S n'est significatif que s'il est supérieur à 3,30 ou inférieur à 0,33. Les effets rhizosphère sont alors appréciés dans l'ordre suivant :

	R/S = 0	: effet inhibiteur total.
	R/S < 0,33	: effet inhibiteur faible.
3,3	< R/S < 10	: effet stimulant faible.
10	< R/S < 33	: effet stimulant moyen.
33	< R/S < 100	: effet stimulant fort.
	R/S > 100	: effet stimulant très important.

Dans le cas des techniques où l'on définit l'intensité des différentes fonctions métaboliques en fonction du temps et des dilutions de terre, on estime qu'une différence d'un exposant de dix des dilutions limites de l'essai, par rapport au témoin, indique un effet faible, de deux, un effet moyen, de trois, un effet fort. La lecture des tableaux II et III qui résument les résultats, permet de dégager les conclusions suivantes :

1. — L'*effet rhizosphère éloignée* ne se manifeste qu'au tallage. Il est toujours stimulant, tous les groupes de micro-organismes étudiés subissent son action, sauf les microflores anaérobie fixatrice d'azote, nitrique et cellulolytique aérobie, mais il est faible et disparaît rapidement ; il n'y en a plus trace à l'épiaison.

2. — L'*effet rhizosphère proche* est soit stimulant, en général, soit inhibiteur dans le cas de la microflore cellulolytique aérobie, ce qui n'avait jamais été bien signalé auparavant. D'autre part, son maximum se situe toujours au moment du tallage [1] qui paraît représenter un stade tout particulièrement intéressant pour l'effet rhizosphère, contrairement aux travaux antérieurs qui avaient situé l'action maximum lors de l'épiaison, ce qui s'explique par le fait que les divers auteurs n'avaient étudié que trois stades : germination, floraison, maturité. Il n'y a presque rien à la germination. Cet effet disparaît rapidement, car à maturité il est limité à quelques groupes seulement.

3. — L'*effet rhizosphère éloignée* varie parallèlement à l'*effet rhizosphère proche*, mais d'une façon très atténuée, ce qui prouve l'étroitesse de la zone d'action des racines dans le sol, car les conditions expérimentales réalisaient une forte densité de racines par rapport à la terre contenue dans le pot.

4. — Avec des cultures en pleine terre, les connaissances actuelles de l'application des méthodes statistiques en microbiologie du sol ne permettent pas d'évaluer la valeur significative des rapports R/S.

On se demande alors à quel moment l'effet rhizosphère atteint sa valeur maximum, s'il y a des différences suivant le type de sol ou la

[1] En fait, il s'agit de la fin du tallage.

TABLEAU II

Influence du stade de la croissance du Blé sur l'effet rhizosphère vis-à-vis des groupes morphologiques de micro-organismes du sol.
(var. Fylgia cultivée dans un limon argileux).

Stades→ / Groupes morphologiques ↓		Germination			Tallage			Épiaison			Maturité		
		Rapport R/S		Effet rhizosphère moyen	Rapport R/S		Effet rhizosphère moyen	Rapport R/S		Effet rhizosphère moyen	Rapport R/S		Effet rhizosphère moyen
		Essai 1956	Essai 1957		Essai 1956	Essai 1957		Essai 1956	Essai 1957		Essai 1956	Essai 1957	
Microflore totale (Bactéries)...........	RE	1,8	1	0	4,3	2,9	+	0,8	0,9	0	1,5	1	0
	RP	3,1	1,8	0	27,7	14,3	++	16,8	6,6	++	5,4	6	+
Actinomycètes........	RE	1,9	0,8	0	11,5	2,1	+	0,7	1,8	0	0,6	1,1	0
	RP	1,9	1	0	35,1	26,3	++	16,7	3,5	++	1,5	1,7	0
Champignons	RE	1	0,8	0	11,2	2,9	+	1,4	0,8	0	0,9	1,3	0
	RP	1	1,1	0	274	150	++++	8,9	11,2	++	10,7	22,4	++

RE : rhizosphère éloignée.
RP : rhizosphère proche.
R/S : rapport des nombres de micro-organismes dans la rhizosphère (R) et le sol témoin (S).
0 : effet rhizosphère nul — $0{,}33 < R/S < 3{,}3$.
\+ : effet rhizosphère stimulant faible — $3{,}3 < R/S < 10$.
++ : effet rhizosphère stimulant moyen — $10 < R/S < 33$.
+++ : effet rhizosphère stimulant fort — $33 < R/S < 100$.
++++ : effet rhizosphère stimulant très important — $R/S > 100$.

Tableau III

Influence du stade de la croissance du Blé sur l'effet rhizosphère vis-à-vis des groupes physiologiques de micro-organismes du sol (var. Fylgia cultivée dans un limon argileux).

Groupes physiologiques ↓ / Stades →		Germination			Tallage			Épiaison			Maturité		
		Rapport R/S		Effet rhizosphère moyen	Rapport R/S		Effet rhizosphère moyen	Rapport R/S		Effet rhizosphère moyen	Rapport R/S		Effet rhizosphère moyen
		Essai 1956	Essai 1957		Essai 1956	Essai 1957		Essai 1956	Essai 1957		Essai 1956	Essai 1957	
Microflore aérobie fixatrice d'azote	RE	1	0,6	0	6,5	2	+	1	0,6	0	2,5	1	0
	RP	1,8	3,6	0	40	20	++	3,1	2	0	2,5	0,8	0
Anaérobie	RE	0,7	0,7	0	1,1	1,1	0	0,8	0,8	0	1	1	0
Microflore ammonifiante	RE	0	0	0	1	1	+	0	0	0	0	0	0
	RP	1	0	0	2	2	++	1	1	+	1	1	+
Microflore nitreuse	RE	0,3	2	0	5,6	10	+	1,6	1	0	0,5	1	0
	RP	1	1,7	0	56	100	+++	5,6	2,4	+	1	1,4	0
Microflore nitrique	RE	1	1	0	1	1,7	0	5,6	1	0	0,4	1	0
	RP	4,6	2	0	160	32,5	+++	28	10	++	1	1	0
Microflore dénitrifiante	RE	0	0	0	1	1	+	0	1	0	0	0	0
	RP	1	1	+	2	2	++	1	1	+	0	0	0
Microflore cellulolytique aérobie	RE	1	0,7	0	1	1	0	1	1	0	0,9	1	0
	RP	0,6	0,7	0	0	0	— — —	0	0	— — —	0,1	0,3	—
Microflore amylolytique	RE	0	0	0	1	1	+	1	0	0	0	0	0
	RP	0	0	0	2	2	++	1	1	+	1	1	+

R/S : rapport des nombres de micro-organismes ou différence des exposants des dilutions limites dans la rhizosphère (R) et le sol témoin (S).
RE : rhizosphère éloignée.
RP : rhizosphère proche.

0 : effet rhizosphère nul — 0,33 < R/S < 3,3.
\+ : effet rhizosphère stimulant faible — 3,3 < R/S < 10 — différence des exposants = 1.
++ : effet rhizosphère stimulant moyen — 10 < R/S < 33 — différence des exposants = 2.
+++ : effet rhizosphère stimulant fort — 33 < R/S < 100 — différence des exposants = 3.
++++ : effet rhizosphère stimulant très important — R/S > 100.
— : effet rhizosphère inhibiteur faible — R/S < 0,33.
— — — : effet rhizosphère inhibiteur total — R/S = 0.

variété de la plante et si, avec une même variété, le fait de la faire taller plus ou moins produit des modifications dans l'effet rhizosphère.

2° La deuxième série d'expériences a porté sur la variété *Fylgia* cultivée dans les mêmes conditions. L'expérimentation a été faite en 1958.

Le but proposé est de déterminer à quel moment du tallage se situe l'effet rhizosphère maximum. Ce stade, d'après Jonard (71), commence dès l'apparition de la première talle et se termine au début de la montée (voir fig. 1, planche 1). Les analyses microbiologiques sont donc faites à trois moments précis :

— Début tallage, soit trente-huit jours après le semis, quand il y a apparition de la talle de première feuille.

— Tallage, soit cinquante jours après le semis, quand il y a toutes les talles primaires.

— Fin tallage-début montée, soixante-deux jours après le semis, lorsque le sommet de l'épi est à 1 centimètre du plateau de tallage.

Les résultats sont donnés dans le tableau IV et peuvent s'interpréter ainsi :

Au cours des essais effectués en 1956 et en 1957, on avait observé que l'effet rhizosphère était maximum à la fin du tallage, au début de la montée. L'analyse des résultats de l'expérimentation faite en 1958 confirme cette conclusion. Au début du tallage, quand il y a apparition de la talle de première feuille, il n'y a pas d'*effet rhizosphère proche*, sauf sur les microflores amylolytique, ammonifiante et nitrique ; puis, au tallage, l'*effet rhizosphère proche* s'étend à la microflore totale, aux Actinomycètes, aux Champignons et à la microflore dénitrifiante, mais il n'y a pas encore d'*effet rhizosphère éloignée*. A la fin du tallage, au début de la montée, l'effet rhizosphère est maximum et comparable à celui qui avait été noté dans les expériences précédentes : faible ou nul dans la *rhizosphère éloignée*, plus élevé dans la *rhizosphère proche*, stimulant en général pour tous les groupes, sauf pour la microflore cellulolytique aérobie qui est inhibée.

3° Une troisième série d'expériences réalisée en 1958, dans des conditions identiques aux précédentes, a pour but de mettre en évidence l'influence du type de sol ou de la variété sur l'effet rhizosphère du Blé à divers stades de sa croissance. Il s'agit de deux sols hébergeant des microflores d'importance différente et ayant même rapport C/N (voir p. 403 et 404) :

— *un limon argileux* ;

— *une rendzine argilo-calcaire*, cinq à dix fois plus riche en micro-organismes,

et de deux variétés de Blé ayant des aptitudes au tallage différentes (71) :

TABLEAU IV. — *Influence du stade du tallage sur l'effet rhizosphère du Blé (var. Fylgia cultivée dans un limon argileux).*

Les résultats sont rapportés à 1 gramme de terre en poids sec et exprimés soit en nombre de micro-organismes, soit en dilutions limites ayant donné lieu au phénomène étudié.

Stades → / Groupes morphologiques ↓		Début tallage				Tallage				Fin tallage-début montée			
		Dénombrement		R/S	Effet rhizosphère	Dénombrement		R/S	Effet rhizosphère	Dénombrement		R/S	Effet rhizosphère
		Témoin	Essai			Témoin	Essai			Témoin	Essai		
Microflore totale exprimée en 10^6 par gramme	RE	19	8	0,4	0	4,9	11	2,3	0	17,1	49,2	2,9	0
	RP		27	1,4	0		24	5	+		244	14,3	++
Actinomycètes exprimés en 10^5 par gramme ..	RE	7,2	5	0,7	0	4,2	9	2,1	0	4,6	9,6	2,1	0
	RP		8,4	1,1	0		21	5	+		121	26,3	++
Champignons exprimés en 10^4 par gramme ..	RE	3,9	3,4	0,9	0	2,2	4,6	2,1	0	4,4	12,6	2,9	0
	RP		5	1,3	0		24	11	++		665	150	++++
Groupes physiologiques ↓													
Microflore aérobie fixatrice d'azote : cellules par gramme	RE	340	260	0,7	0	2 200	1 600	0,7	0	250	500	2	0
	RP		700	2	0		4 000	1,8	0		5 000	20	++
Microflore ammonifiante : dilutions limites	RE	10^{-6}	10^{-6}	0	0	10^{-6}	10^{-6}	0	0	10^{-6}	10^{-7}	1	+
	RP		10^{-7}	1	+		10^{-7}	1	+		10^{-8}	2	++
Microflore nitreuse : cellules par gramme	RE	500	500	1	0	500	700	1,4	0	1 400	14 000	10	+
	RP		500	1	0		220	0,4	0		140 000	100	+++
Microflore nitrique : cellules par gramme	RE	400	500	1,2	0	320	700	2,2	0	800	1 400	1,7	0
	RP		3 300	8,2	+		3 200	10	+		26 000	32,5	++
Microflore dénitrifiante : dilutions limites	RE	10^{-7}	10^{-7}	0	0	10^{-5}	10^{-5}	0	0	10^{-6}	10^{-7}	1	+
	RP		10^{-7}	0	0		10^{-6}	1	+		10^{-8}	2	++
Microflore cellulolytique aérobie : aspect de la culture..............	RE	culture normale	culture normale	1	0	culture normale	culture normale	1	0	culture normale	culture normale	1	0
	RP		—	1	0		—	1	0		inhibit. totale	0	— — —
Microflore amylolytique : dilutions limites	RE	10^{-5}	10^{-5}	0	0	10^{-5}	10^{-5}	0	0	10^{-6}	10^{-7}	1	+
	RP		10^{-6}	1	+		10^{-6}	1	+		10^{-8}	2	++

RE : rhizosphère éloignée.
RP : rhizosphère proche.
R/S : rapport des nombres de micro-organismes ou différence des exposants des dilutions limites dans la rhizosphère (R) et le sol témoin (S).
0 : effet rhizosphère nul.

+ : effet rhizosphère stimulant faible.
++ : effet rhizosphère stimulant moyen.
+++ : effet rhizosphère stimulant fort.
++++ : effet rhizosphère stimulant très important.
— : effet rhizosphère inhibiteur partiel.
— — — : effet rhizosphère inhibiteur total.

— *Blé d'Avril* tallant faiblement.

— *Fylgia* tallant fortement.

Les résultats sont donnés dans les tableaux V et VI qui indiquent les effets rhizosphère en fonction des stades de la croissance du Blé, suivant le type de sol ou la variété. Dans tous les cas, l'*effet rhizosphère proche* évolue de la même façon : pratiquement nul lors de la germination, maximum au moment du tallage (fin tallage-début montée), encore net à l'épiaison et peu décelable à maturité. La teneur en micro-organismes du sol influe directement sur l'effet rhizosphère qui varie en sens inverse : ainsi, dans une terre d'expérience riche (*rendzine argilo-calcaire*), il y a une diminution des rapports R/S telle qu'il n'est même plus possible d'observer un *effet rhizosphère éloignée* vis-à-vis des groupes morphologiques de micro-organismes du sol. Ceci peut expliquer, dans une certaine mesure, les différences observées par les divers auteurs qui expérimentent souvent sans préciser les qualités microbiologiques de la terre qu'ils utilisent. Il faut noter aussi que l'analyse chimique des deux terres étudiées donne une même valeur au rapport C/N et qu'ainsi ce facteur ne joue pas.

TABLEAU V. — *Influence du type de sol et de la variété sur l'effet rhizosphère du Blé.*

Groupes morphologiques ↓ / Stades →		Germination		Tallage		Épiaison		Maturité	
		F	A	F	A	F	A	F	A
Rhizosphère éloignée									
Microflore totale (Bactéries)	TA	o	o	+	o	o	o	o	o
	TC	o	o	o	o	o	o	o	o
Actinomycètes	TA	o	o	+	o	o	o	o	o
	TC	o	o	o	o	o	o	o	o
Champignons	TA	o	o	+	o	o	o	o	o
	TC	o	o	o	o	o	o	o	o
Rhizosphère proche									
Microflore totale (Bactéries)	TA	o	o	++	+	++	+	+	o
	TC	o	o	+	o	+	o	+	o
Actinomycètes	TA	o	o	++	+	++	o	o	o
	TC	o	o	+	o	o	o	o	o
Champignons	TA	o	o	++++	++	++	+	++	+
	TC	o	o	++	+	+	o	+	+

F : *Fylgia*.
A : *Blé d'avril*
TA : limon argileux.
TC : rendzine argilo-calcaire.
o : effet rhizosphère nul.
\+ : effet rhizosphère stimulant faible.
++ : effet rhizosphère stimulant moyen.
+++ : effet rhizosphère stimulant fort.
++++ : effet rhizosphère stimulant très important.

TABLEAU VI

Influence du type de sol et de la variété sur l'effet rhizosphère du Blé.

Groupes physiologiques ↓ / Stades →		Germination		Tallage		Épiaison		Maturité	
Rhizosphère éloignée		F	A	F	A	F	A	F	A
Microflore aérobie fixatrice d'azote	TA	o	o	+	o	o	o	o	o
	TC	o	o	o	o	o	o	o	o
Microflore ammonifiante	TA	o	o	+	o	o	o	o	o
	TC	o	o	+	o	o	o	o	o
Microflore nitreuse..............	TA	o	o	+	o	o	o	o	o
	TC	o	o	o	o	o	o	o	o
Microflore nitrique..............	TA	o	o	+	o	+	o	o	o
	TC	o	o	o	o	o	o	o	o
Microflore dénitrifiante...........	TA	o	o	+	o	o	o	o	o
	TC	o	o	+	o	o	o	o	o
Microflore cellulolytique aérobie...	TA	o	o	—	—	—	—	o	o
	TC	o	o	—	—	—	—	o	o
Microflore amylolytique	TA	o	o	+	+	+	o	o	o
	TC	o	o	+	+	o	o	o	o
Rhizosphère proche									
Microflore aérobie fixatrice d'azote..	TA	o	o	++	+	+	+	o	o
	TC	o	o	+	+	o	o	o	o
Microflore ammonifiante	TA	+	+	++	+	+	+	+	o
	TC	o	o	+	+	o	o	o	o
Microflore nitreuse..............	TA	o	o	+++	++	+	+	o	o
	TC	o	o	++	+	+	o	o	o
Microflore nitrique..............	TA	o	o	+++	++	++	+	o	o
	TC	o	o	++	+	o	o	o	o
Microflore dénitrifiante...........	TA	+	+	++	+	+	+	o	o
	TC	o	o	+	+	+	o	o	o
Microflore cellulolytique aérobie...	TA	o	o	— — —	— — —	— — —	— — —	o	o
	TC	o	o	— — —	— — —	— — —	— — —	o	o
Microflore amylolytique	TA	o	o	++	++	+	+	+	o
	TC	o	o	++	+	+	o	o	o

F : *Fylgia.*
A : *Blé d'avril.*
TA : limon argileux.
TC : rendzine argilo-calcaire.
o : effet rhizosphère nul.
\+ : effet rhizosphère stimulant faible.
++ : effet rhizosphère stimulant moyen.
+++ : effet rhizosphère stimulant fort.
++++ : effet rhizosphère stimulant très important.
— : effet rhizosphère inhibiteur partiel.
— — — : effet rhizosphère inhibiteur total.

Le facteur variétal est responsable d'un phénomène identique : si la variété a une faible aptitude au tallage, les rapports R/S sont compris dans des limites beaucoup plus étroites, l'effet rhizosphère est moins net ; seule une variété tallant fortement permet d'observer un *effet rhizosphère éloignée* au moment du tallage (avec une seule exception dans le cas de la microflore amylolytique). Les meilleures conditions sont donc celles qui réunissent une variété ayant une bonne aptitude au tallage (*Fylgia*), semée dans une terre pas trop riche en micro-organismes (*limon argileux*), mais ne présentant pas de carences (riche en *Azotobacter*). En résumé, ces deux facteurs ont une action quantitative et non qualitative sur l'effet rhizosphère.

4° Les résultats précédents montrent que, dans un même sol, à la fin du tallage, au début de la montée, la variété de Blé ayant la plus forte aptitude au tallage exerce l'effet rhizosphère le plus élevé que l'on puisse observer au cours de sa croissance. On peut se demander si cet effet est lié au fait même du tallage.

La réponse est donnée par l'expérience suivante : on fait taller plus ou moins la variété *Fylgia* en agissant sur la profondeur du semis, les autres conditions d'expérimentation restant identiques. Il est nécessaire d'utiliser la terre la plus pauvre en micro-organismes, afin de ne pas risquer de masquer les effets rhizosphère de faible amplitude. Pour avoir des différences suffisamment nettes, on n'analyse que l'*effet rhizosphère proche*. On obtient deux lots, un tallé (trois tiges par grain semé) et un non tallé (une tige par grain semé).

Les résultats sont donnés dans les tableaux VII et VIII.

TABLEAU VII

Rapports entre les poids des tiges et ceux des racines plus la terre adhérente. (Var. Fylgia cultivée dans un limon argileux).

Cultures		Poids (en g.)		Rapport T/R
		Tiges (T)	Racines + terre adhérente (R)	
Non tallées	essai 1	2,1	7,1	0,30
	essai 2	3,2	11,1	0,29
Tallées	essai 1	5,9	11,3	0,53
	essai 2	6,2	12,1	0,50

Les cultures ayant tallé ont un rapport T/R plus élevé que les cultures non tallées et, dans l'ensemble, un *effet rhizosphère proche* plus important vis-à-vis des divers groupes morphologiques et physiologiques

Tableau VIII

Confirmation de l'importance du tallage sur l'effet rhizosphère proche du Blé (*var. Fylgia cultivée dans un limon argileux*).

Essais / Groupes morphologiques	Témoin	Lot non tallé					Lot ayant tallé					Augmentation moy. (%)
		Essai 1		Essai 2		Effet rhizosphère moyen	Essai 1		Essai 2		Effet rhizosphère moyen	
	Dénombrement	Dénombrement	R/S	Dénombrement	R/S		Dénombrement	R/S	Dénombrement	R/S		
Microflore totale exprimée en 10^6 par gramme	11	152	13,7	97	8,7	++	307	27,8	403	36,4	++	185
Actinomycètes exprimés en 10^5 par gramme	4,5	80	17,7	69	15,2	++	112	24,7	134	29,6	++	65
Champignons exprimés en 10^4 par gramme	6,3	100	15,9	228,3	36,3	++	315	50	358	56,8	+++	104
Groupes physiologiques												
Microflore aérobie fixatrice d'azote : cellules par gramme	400	2 200	5,5	2 200	5,5	+	5 000	12,5	5 000	12,5	++	127
Microflore ammonifiante : dilutions limites	10^{-4}	10^{-6}	2	10^{-6}	2	++	10^{-7}	3	10^{-7}	3	+++	1 dilut.
Microflore nitreuse : cellules par gramme	500	23 000	46	23 000	46	+++	26 000	52	40 000	80	+++	45
Microflore nitrique : cellules par gramme	500	5 000	10	5000	10	+	19 000	38	11 000	22	++	200
Microflore dénitrifiante : dilutions limites	10^{-5}	10^{-6}	1	10^{-7}	2	++	10^{-8}	3	10^{-8}	3	+++	1 dilut.
Microflore cellulolytique aérobie : aspect de la culture..	culture normale	inhibit. totale	0	inhibit. totale	0	— — —	inhibit. totale	0	inhibit. totale	0	— — —	nulle
Microflore amylolytique : dilutions limites	10^{-6}	10^{-7}	1	10^{-7}	1	+	10^{-8}	2	10^{-8}	2	++	1 dilut.

Les résultats sont rapportés à 1 gramme de terre en poids sec et exprimés soit en nombre de micro-organismes, soit en dilutions limites ayant donné lieu au phénomène étudié.

R/S : rapport des nombres de micro-organismes ou différence des exposants des dilutions limites dans la rhizosphère (R) et le sol témoin (S).

0 : effet rhizosphère nul.
\+ : effet rhizosphère stimulant faible.
++ : effet rhizosphère stimulant moyen.
+++ : effet rhizosphère stimulant fort.
— — — : effet rhizosphère inhibiteur total.

de micro-organismes du sol ; l'augmentation moyenne, en pourcentage, des rapports R/S étant la plus élevée dans le cas de la microflore nitrique (200 p. 100), la plus faible dans celui de la microflore nitreuse (45 p. 100), mais du même ordre de grandeur que celle des rapports T/R (75 p. 100). Les rapports R/S caractérisant l'*effet rhizosphère proche* chez une même variété, dans un sol donné, varient donc dans le même sens que les rapports T/R : plus le tallage est important, plus l'effet rhizosphère est net et accentué.

En résumé, le maximum de l'effet rhizosphère se situe toujours à la fin du tallage. Son amplitude varie en fonction du nombre des talles et en raison inverse de la richesse en micro-organismes de la terre utilisée. On se demande alors quelle est la cause de l'effet rhizosphère. C'est ce que nous avons recherché dans la deuxième partie de ce travail.

B. — ÉTUDE DES EXCRÉTIONS RADICELLAIRES DU BLÉ A LA FIN DU TALLAGE (1)

I. — Matériel et méthodes.

Suivant les auteurs (46, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63), deux causes principales sont responsables de l'effet rhizosphère :

1. L'excrétion de substances organiques par les racines.
2. La desquamation du chevelu radicellaire et la dégradation de fragments de racines.

Mais les avis diffèrent sur l'importance relative de ces deux causes, ainsi que sur la nature des produits excrétés. De plus, comme les techniques employées sont très diverses, il est très difficile de comparer les résultats. L'étude critique bibliographique permet encore de préciser un certain nombre de conditions nécessaires pour conduire une expérimentation correcte :

1. Les processus liés au métabolisme de la germination sont distincts de l'excrétion normale des racines de plantes plus âgées, ce qui proscrit toutes les techniques d'excision des racines de jeunes plantules germées (56, 57, 60).
2. Il faut pouvoir séparer l'action due aux excrétions radicellaires de celle provoquée par la desquamation des cellules mortes (52).

(1) Il est nécessaire de souligner que, dans la plupart des publications ayant trait à la rhizosphère, l'adjectif radiculaire est le plus fréquemment employé, ce qui est impropre, car il ne s'applique qu'à la radicule. L'adjectif radicellaire « qui appartient ou qui se rapporte à la racine ou aux radicelles » (*cf. Larousse*) correspond tout à fait au sens qu'il faut lui donner. En effet, au fur et à mesure de la croissance de la plante, les excrétions sont d'abord radiculaires, puis radicellaires, et l'on verra que ce sont ces dernières qui jouent le rôle le plus important dans l'effet rhizosphère. Les auteurs emploient indifféremment les termes exsudats, sécrétions ou excrétions pour désigner les diverses substances libérées par les racines au cours de la vie de la plante : il semble que le mot « excrétions » soit le plus convenable, car il ne s'agit pas de substances liées à l'existence d'organes spécialisés (sécrétions).

3. Les excrétions radicellaires doivent être obtenues dans des conditions aseptiques, car elles sont rapidement métabolisées par les micro-organismes (50, 53).

4. Leur action doit être testée d'une façon écologique (52, 53, 65).

Toutes ces raisons nous ont conduit à réaliser une rhizosphère artificielle. Il s'agit d'obtenir artificiellement ce qui s'observe naturellement dans la rhizosphère d'une plante donnée, et non pas d'avoir une rhizosphère expérimentale qui implique la présence de racines. Dans le cas du Blé, c'est à la fin du tallage que l'effet rhizosphère est le plus élevé. Il est donc nécessaire d'obtenir les excrétions radicellaires à ce stade après une culture aseptique, puis de tester leur action sur les micro-organismes du sol.

1° **Culture aseptique.**

La technique est la suivante :

a) DÉSINFECTION DES GRAINS

Les grains de Blé sont brossés soigneusement pour enlever les poussières et une partie des germes y adhérant, puis désinfectés par trempage dans $HgCl_2$ à 2 p. 1000 dans l'alcool à 70 p. 100 pendant dix minutes, et lavés huit fois dans de l'eau stérile pour éliminer les traces de germicide. Les grains sont alors mis à germer dans des boîtes de Pétri contenant du bouillon de Haricots gélosé, et incubés soixante-douze heures à 22°C pour contrôler l'asepsie et le pouvoir germinatif (v. fig. 4, pl. III).

b) GERMINATION ASEPTIQUE

Les grains germés sont introduits aseptiquement, un grain par tube, dans des tubes de 22 × 220 millimètres contenant 20 millilitres d'une solution nutritive dans laquelle plonge un tampon de coton cardé de telle sorte qu'affleure environ 1 millimètre de hauteur de liquide. Le tiers inférieur de chaque tube est recouvert de papier noir pour mettre les racines à l'abri de la lumière (v. fig. 5, pl. III).

c) TRANSFERT DE LA PLANTE AU COURS DE LA CROISSANCE

Après huit jours environ, les jeunes plantules qui viennent au contact du coton bouchant le tube sont introduites aseptiquement dans une fiole Pyrex de 1 litre, à large ouverture, soutenues par un support en fil de fer, maintenues par trois ou quatre tampons de coton cardé serrés autour de la tige. Un dispositif simple comprenant un tube de verre recourbé allant au fond de la fiole et relié par un tube de caoutchouc,

muni d'une pince, à la partie inférieure d'une autre fiole identique, à moitié remplie d'eau stérile, permet d'aérer et de maintenir constant le niveau du liquide nutritif en compensant l'évaporation (v. fig. 10 et 11, pl. VI). Les fioles sont recouvertes de papier noir et introduites dans une serre (v. fig. 6 et 7, pl. IV). L'aération et le maintien du niveau du liquide au contact du plateau de tallage sont effectués une fois par semaine.

d) COMPOSITION DE LA SOLUTION NUTRITIVE

Il existe de nombreuses formules signalées par CHOUARD (83) et DEMOLON (84). La composition suivante paraît bien équilibrée :

Sulfate d'ammonium	0,5 g	Chlorure de manganèse	0,002 g
Sulfate de magnésium	0,1 g	Silicate de sodium	0,002 g
Phosphate monopotassique	0,5 g	Sulfate d'aluminium	0,002 g
Sulfate de fer	0,02 g	Borate de sodium	0,002 g
Carbonate de calcium	2 g	Iodure de potassium	0,001 g
Chlorure de zinc	0,002g	Fluorure de sodium	0,001 g
Eau de source	1 000 ml		

Le pH est de 7,5. On stérilise vingt minutes à 120°C.

e) PRÉCAUTIONS A PRENDRE

Il est indispensable, au moment du transfert, d'opérer rapidement afin d'éviter les contaminations, et de ne pas trop serrer les tampons de coton autour de la jeune tige pour que la plante puisse croître normalement. L'aération doit se faire avec précautions en siphonant le contenu d'une fiole dans l'autre, celle de la culture aseptique se remplissant d'air filtré par le coton, puis en ajustant ensuite à niveau constant par la manœuvre inverse. Après un temps plus ou moins long, le Blé talle et, à la fin du tallage, au début de la montée, après avoir vérifié l'asepsie par un examen microscopique et des subcultures, les plantes sont enlevées, les racines lavées, et la solution nutritive plus l'eau de lavage stérilisées par filtration à travers une membrane d'amiante-cellulose (SEITZ EK). On amène à pH = 6,0 avec H_2SO_4 N et l'on concentre sous vide à basse température (t < 45°C) dix et quarante fois.

2° **Rhizosphère artificielle.**

a) RÉALISATION EXPÉRIMENTALE D'UNE RHIZOSPHÈRE ARTIFICIELLE

Après avoir laissé sécher à l'air le même limon argileux [1] préalablement tamisé (tamis n° 2) et homogénéisé, 100 grammes sont prélevés, introduits dans une boîte de Pétri de 12 centimètres de diamètre, laquelle est portée dans une grande boîte de 20 centimètres de diamètre dont on

[1] Les résultats de l'analyse physique, chimique et microbiologique sont résumés dans le tableau I (voir p. 403 et 404).

règle l'ouverture du couvercle pour ralentir ou accélérer l'évaporation (v. fig. 3, pl. II). On ajuste tous les jours à 20 p. 100 d'humidité avec les excrétions radicellaires concentrées (pour les essais) ou la solution nutritive concentrée de façon identique (pour le témoin), jusqu'à ce que l'on ait incorporé 100 millilitres, puis ensuite avec de l'eau stérile. L'incubation est maintenue à 22°C. Les essais sont faits en double exemplaire.

b) ANALYSES MICROBIOLOGIQUES EFFECTUÉES

On verse tout le contenu de la boîte dans une capsule. Après homogénéisation, on prélève, en une vingtaine de fractions, 5 grammes, et le reste est remis à incuber comme précédemment.

On recherche, avec les techniques déjà décrites, les groupes morphologiques et les groupes physiologiques de micro-organismes du sol étudiés auparavant (voir p. 406).

On réalise deux expériences, l'une avec la solution nutritive concentrée dix fois, incubée dix-sept jours, l'autre avec la solution concentrée quarante fois, pendant quarante-deux jours, suivant les données résumées dans le tableau IX.

TABLEAU IX

Réalisation expérimentale d'une rhizosphère artificielle (le concentrat d'une culture aseptique du Blé var. Fylgia est incorporé dans un limon argileux).

Incubation 22° C (durée en j)	Quantité ajoutée en ml		Analyses
	1re expérience C × 10	2e expérience C × 40	
0	20	20	
1	16	20	
3	8	9	
4	7	11	1re
5	9	10	
8	10	9	2e
11	15	8	
14	15	13	
17	arrêt de l'expérience	ajuster avec de l'eau	3e
25		stérile tous les jours	4e
42		arrêt de l'expérience	5e

C × 10 : après avoir concentré dix fois la solution nutritive aseptique.
C × 40 : après avoir concentré quarante fois la solution nutritive aseptique.

II. — Résultats et discussion.

Ils sont donnés dans les tableaux X, XI et XII et se résument ainsi :

Dans le cas de la solution nutritive concentrée dix fois, les résultats sont négatifs, sauf en ce qui concerne les *microflores ammonifiante,*

Tableau X

Réalisation expérimentale d'une rhizosphère artificielle.

(100 ml de la solution nutritive aseptique du Blé var. *Fylgia*, concentrée dix fois, sont incorporés dans 100 g de limon argileux)

Les résultats sont rapportés à 1 gramme de terre en poids sec et exprimés soit en nombre de micro-organismes, soit en dilutions limites ayant donné lieu au phénomène étudié.

Groupes de micro-organismes	Incubation à 22°C (en j)	Témoin Dénombrement	Essai 1 Dénombrement	Essai 1 R/S	Essai 2 Dénombrement	Essai 2 R/S	Effet rhizosphère moyen
Groupes morphologiques							
Microflore totale exprimée en 10^6 par gramme	4	43,2	31,2	0,7	46,8	1,1	0
	8	96	83	0,8	84	0,9	0
	17	71	36	0,5	87	1,2	0
Actinomycètes exprimés en 10^5 par gramme	4	1,2	0,9	0,7	1	0,8	0
	8	1,6	1,3	0,8	1,1	0,7	0
	17	1	1,5	1,5	0,7	0,7	0
Champignons exprimés en 10^4 par gramme	4	72	77	1,1	71	1	0
	8	144	97	0,7	140	1	0
	17	192	120	0,6	144	0,8	0
Groupes physiologiques							
Microflore aérobie fixatrice d'azote : cellules par gramme	4	400	400	1	700	1,8	0
	8	160	180	1,1	160	1	0
	17	260	340	1,3	400	1,5	0
Microflore ammonifiante : dilutions limites	4	10^{-6}	10^{-6}	0	10^{-6}	0	0
	8	10^{-6}	10^{-6}	0	10^{-6}	0	0
	17	10^{-6}	10^{-7}	1	10^{-7}	1	+
Microflore nitreuse : cellules par gramme	4	700	2 300	3,2	1 200	1,7	0
	8	500	1 200	2,4	700	1,4	0
	17	1 800	12 000	6,6	7 000	3,8	+
Microflore nitrique : cellules par gramme	4	5 000	2 300	0,4	5 000	1	0
	8	1 200	5 000	4,1	2 300	2	0
	17	7 000	50 000	7,1	50 000	7,1	+
Microflore dénitrifiante : dilutions limites	4	10^{-6}	10^{-6}	0	10^{-6}	0	0
	8	10^{-6}	10^{-6}	0	10^{-6}	0	0
	17	10^{-7}	10^{-7}	0	10^{-7}	0	0
Microflore cellulolytique aérobie : aspect de la culture	4	culture normale	culture normale	1	culture normale	1	0
	8	culture normale	culture normale	1	culture normale	1	0
	17	culture normale	culture normale	1	culture normale	1	0
Microflore amylolytique : dilutions limites	4	10^{-5}	10^{-5}	0	10^{-5}	0	0
	8	10^{-5}	10^{-5}	0	10^{-5}	0	0
	17	10^{-5}	10^{-5}	0	10^{-5}	0	0

R/S : rapport des nombres de micro-organismes ou différence des exposants des dilutions limites dans la rhizosphère (R) et le sol témoin (S).

0 : effet rhizosphère nul.

\+ : effet rhizosphère stimulant faible.

Tableau XI

Réalisation expérimentale d'une rhizosphère artificielle.

(100 ml de la solution nutritive aseptique du Blé var. *Fylgia*, concentrée quarante fois, sont incorporés dans 100 g de limon argileux)

Les résultats sont rapportés à 1 gramme de terre en poids sec et exprimés en nombre de micro-organismes.

Groupes morphologiques	Incubation à 22°C (en j)	Témoin	Essai 1		Essai 2		Effet rhizosphère moyen
		Dénombrement	Dénombrement	R/S	Dénombrement	R/S	
Microflore totale exprimée en 10^6 par gramme	4	13,5	70,4	5,3	82,2	6	+
	8	27,8	201	7,2	176	6,3	+
	17	28,8	228	7,8	326	11,7	++
	25	27,6	107	3,8	170	6,1	+
	42	72	90	1,2	78	1	0
Actinomycètes exprimés en 10^5 par gramme	4	0,19	0,62	3,2	0,53	2,7	0
	8	0,14	0,35	2,5	0,45	3,2	0
	17	0,21	0,46	2,2	0,56	2,7	0
	25	0,12	0,96	8	0,65	5,4	+
	42	0,41	0,72	1,7	0,50	1,2	0
Champignons exprimés en 10^4 par gramme	4	21,6	30	1,4	24	1,1	0
	8	86	104	1,2	105	1,2	0
	17	89	440	4,9	420	4,7	+
	25	16,8	10,8	0,6	6,4	0,4	0
	42	13,2	8,3	0,6	9,7	0,7	0

R/S : rapport des nombres de micro-organismes dans la rhizosphère (R) et le sol témoin (S).
0 : effet rhizosphère nul.
\+ : effet rhizosphère stimulant faible.
++ : effet rhizosphère stimulant moyen.

nitreuse et nitrique qui, après dix-sept jours d'incubation, présentent des rapports R/S significatifs. Cette concentration est donc insuffisante.

Par contre, après avoir incorporé les excrétions radicellaires concentrées quarante fois (100 ml correspondant à quatre plantes pour 100 g de terre), on observe un effet rhizosphère stimulant au bout de quatre jours d'incubation, atteignant sa valeur maximum après dix-sept jours dans le cas de la *microflore totale* et des Champignons, et vingt-cinq jours dans celui des Actinomycètes. La *microflore aérobie fixatrice d'azote* ne montre pas de variation significative. Les *microflores nitreuse* et *nitrique* évoluent comme précédemment. La *microflore cellulolytique aérobie* est inhibée totalement le dix-septième jour, ce qui coïncide avec l'action maximum sur les Champignons [1].

La *microflore dénitrifiante* évolue presque parallèlement à la *microflore ammonifiante*, mais avec un certain décalage dans le temps. Il y a un effet rhizosphère stimulant la *microflore amylolytique* après dix-sept

[1] Quand il y a une inhibition totale des Bactéries cellulolytiques aérobies, la plaque de silicogel est envahie par des Champignons.

Tableau XII

Réalisation expérimentale d'une rhizosphère artificielle.

(100 ml de la solution nutritive aseptique du Blé var. *Fylgia*, concentrée quarante fois, sont incorporés dans 100 g de limon argileux)

Les résultats sont rapportés à 1 gramme de terre en poids sec et exprimés soit en nombre de micro-organismes, soit en dilutions limites ayant donné lieu au phénomène étudié.

Groupes physiologiques	Incubation à 22°C (en j)	Témoin	Essai 1		Essai 2		Effet rhizosphère moyen
		Dénombrement	Dénombrement	R/S	Dénombrement	R/S	
Microflore aérobie fixatrice d'azote : cellules par gramme	4	260	340	1,3	260	1	0
	8	260	260	1	500	1,9	0
	17	500	160	0,3	220	0,4	0
	25	340	340	1	340	1	0
	42	160	80	0,5	80	0,5	0
Microflore ammonifiante : dilutions limites	4	10^{-5}	10^{-5}	1	10^{-6}	1	+
	8	10^{-6}	10^{-7}	1	10^{-8}	2	+
	17	10^{-5}	10^{-7}	2	10^{-7}	2	++
	25	10^{-6}	10^{-6}	0	10^{-6}	0	0
	42	10^{-6}	10^{-6}	0	10^{-6}	0	0
Microflore nitreuse : cellules par gramme	4	2 200	2 300	1	1 200	0,6	0
	8	500	320	0,6	220	0,4	0
	17	700	8 000	11,3	3 200	4,5	+
	25	500	320	0,6	500	1	0
	42	500	1 200	2,4	700	1,4	0
Microflore nitrique : cellules par gramme	4	700	700	1	700	1	0
	8	1 200	1 100	0,9	700	0,6	0
	17	1 800	8 000	4,4	7 000	3,9	+
	25	220	500	2,3	700	3,2	0
	42	120	320	2,9	400	3,4	0
Microflore dénitrifiante : dilutions limites	4	10^{-6}	10^{-6}	0	10^{-6}	0	0
	8	10^{-6}	10^{-7}	1	10^{-6}	0	0
	17	10^{-6}	10^{-8}	2	10^{-8}	2	++
	25	10^{-5}	10^{-6}	1	10^{-6}	1	+
	42	10^{-6}	10^{-6}	0	10^{-6}	0	0
Microflore cellulolytique aérobie (1) : aspect de la culture	4	culture normale	culture normale	1	culture normale	1	0
	8	culture normale	culture normale	1	culture normale	1	0
	17	culture normale	inhibition totale	0	inhibition totale	0	— — —
	25	culture normale	inhibition totale	0	inhibition totale	0	— — —
	42	culture normale	inhibition totale	0	inhibition totale	0	— — —
Microflore amylolytique : dilutions limites	4	10^{-6}	10^{-6}	0	10^{-6}	0	0
	8	10^{-7}	10^{-7}	0	10^{-7}	0	0
	17	10^{-5}	10^{-7}	2	10^{-7}	2	++
	25	10^{-7}	10^{-7}	0	10^{-7}	0	0
	42	10^{-5}	10^{-6}	0	10^{-6}	0	0

(1) Quand il y a inhibition totale des Bactéries cellulolytiques aérobies, la plaque de silico-gel est envahie par les Champignons.

R/S : rapport des nombres de micro-organismes ou différence des exposants des dilutions limites dans la rhizosphère (R) et le sol témoin (S).

0 : effet rhizosphère nul.
\+ : effet rhizosphère stimulant faible.
++ : effet rhizosphère stimulant moyen.
— — — : effet rhizosphère inhibiteur total.

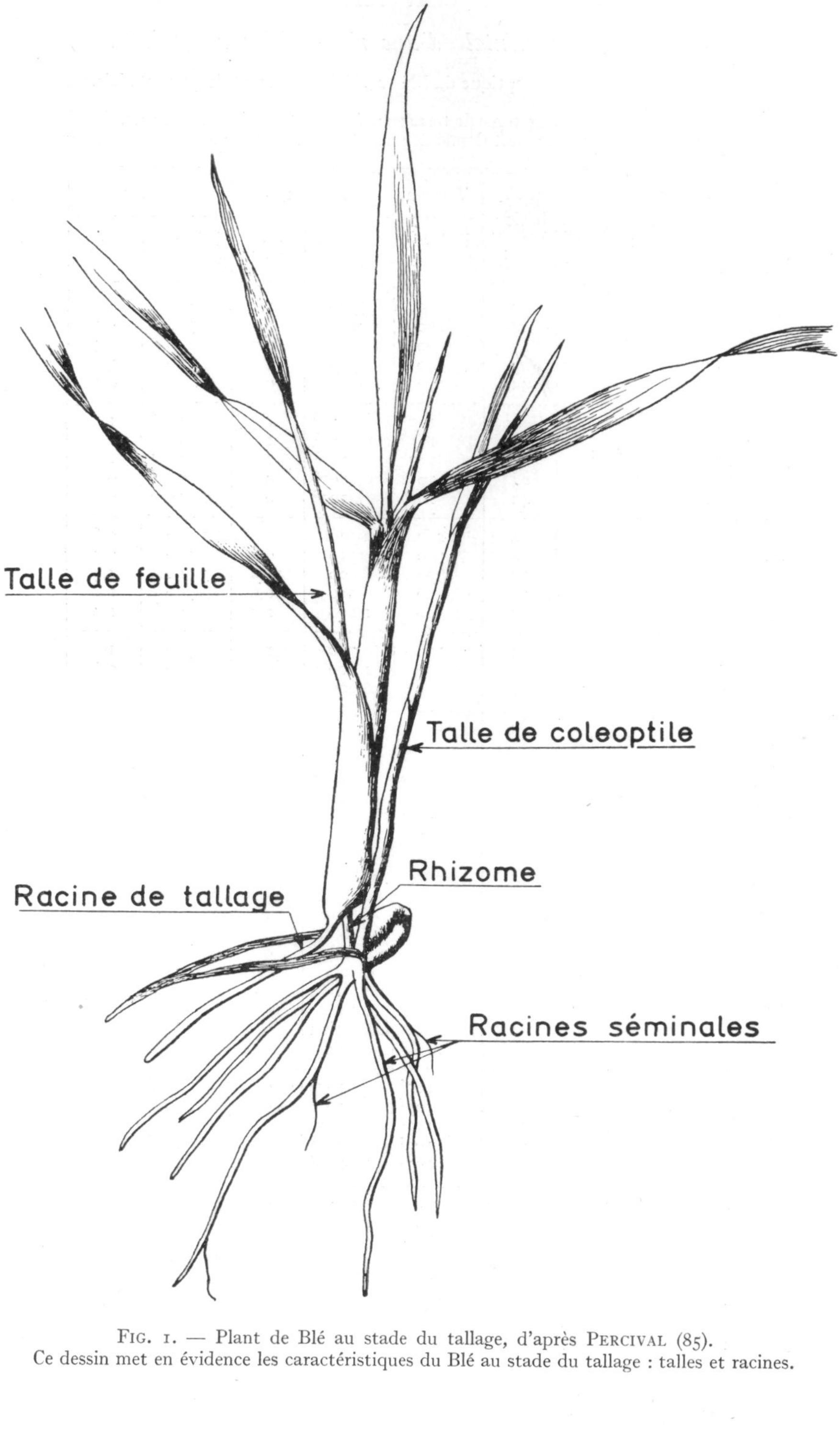


FIG. 1. — Plant de Blé au stade du tallage, d'après PERCIVAL (85).
Ce dessin met en évidence les caractéristiques du Blé au stade du tallage : talles et racines.

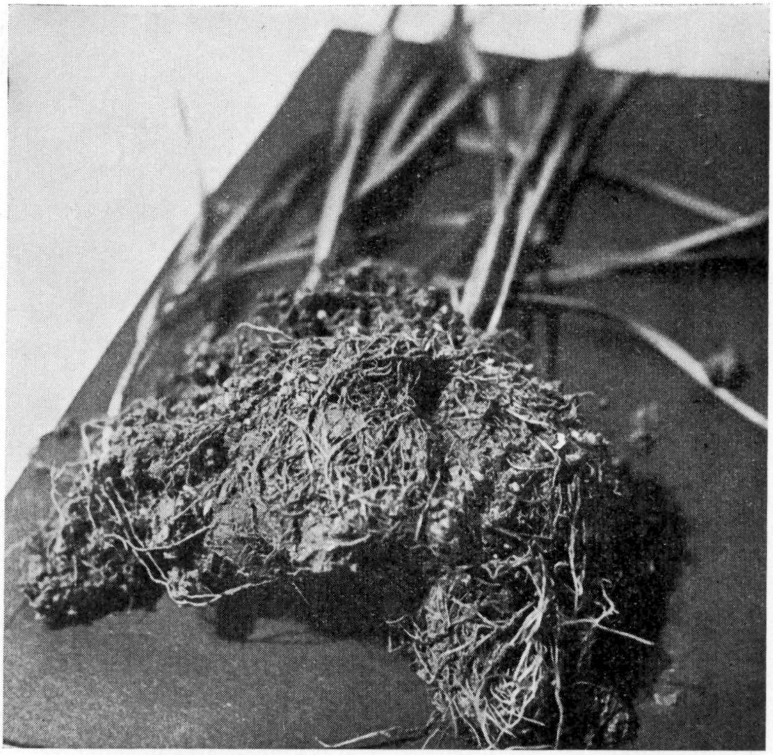


FIG. 2. — Rhizosphère du Blé à la fin du tallage.

Les plantes sont enlevées avec précaution après avoir décollé le bloc de terre avec une spatule. On voit qu'il y a une grande quantité de racines par rapport à la terre contenue dans le pot. Une fois les racines enlevées avec la terre adhérente (rhizosphère proche), ce qui reste représente la rhizosphère éloignée.

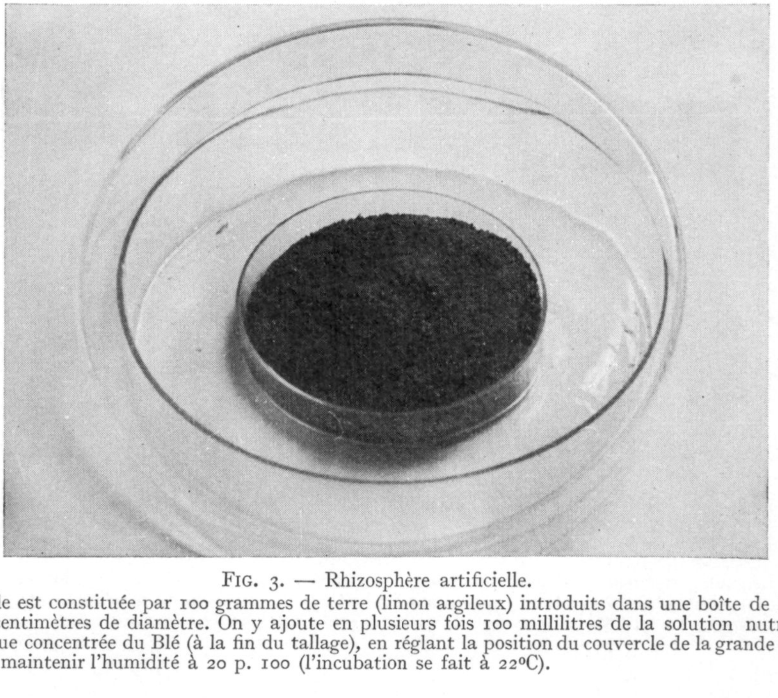


FIG. 3. — Rhizosphère artificielle.

Elle est constituée par 100 grammes de terre (limon argileux) introduits dans une boîte de Pétri de 12 centimètres de diamètre. On y ajoute en plusieurs fois 100 millilitres de la solution nutritive aseptique concentrée du Blé (à la fin du tallage), en réglant la position du couvercle de la grande boîte afin de maintenir l'humidité à 20 p. 100 (l'incubation se fait à 22°C).

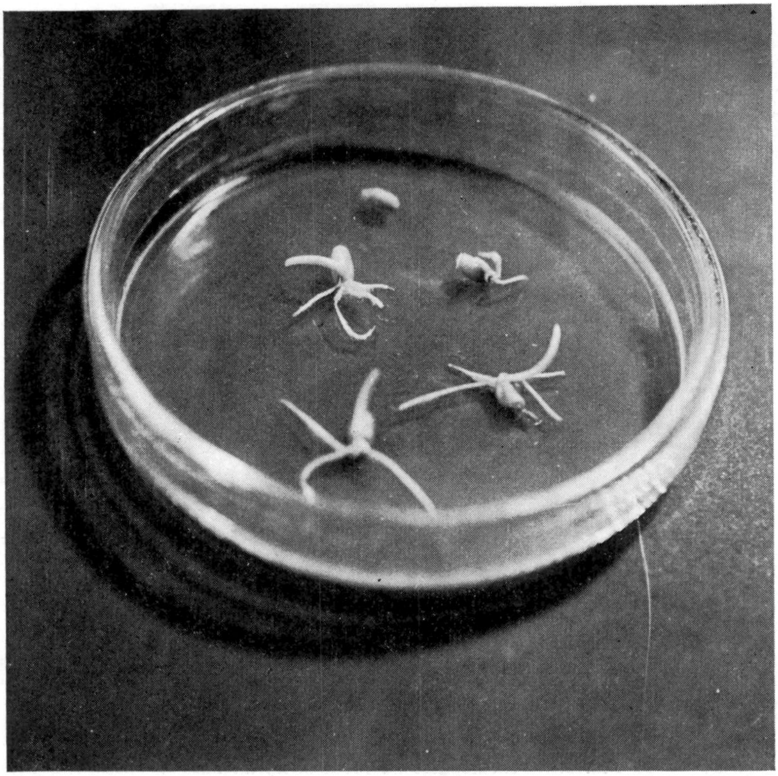


FIG. 4. — Germination aseptique des grains.

Après avoir été désinfectés ($HgCl_2$), puis lavés stérilement, ils sont mis à germer sur une plaque de gélose-Haricots pour contrôler l'asepsie et le pouvoir germinatif.

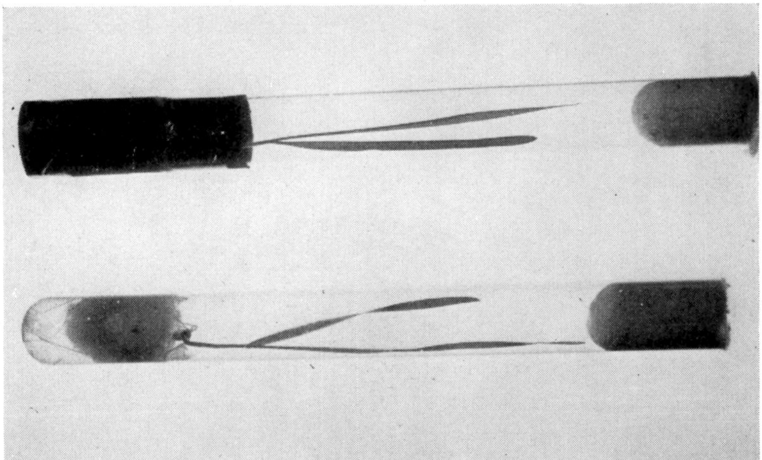
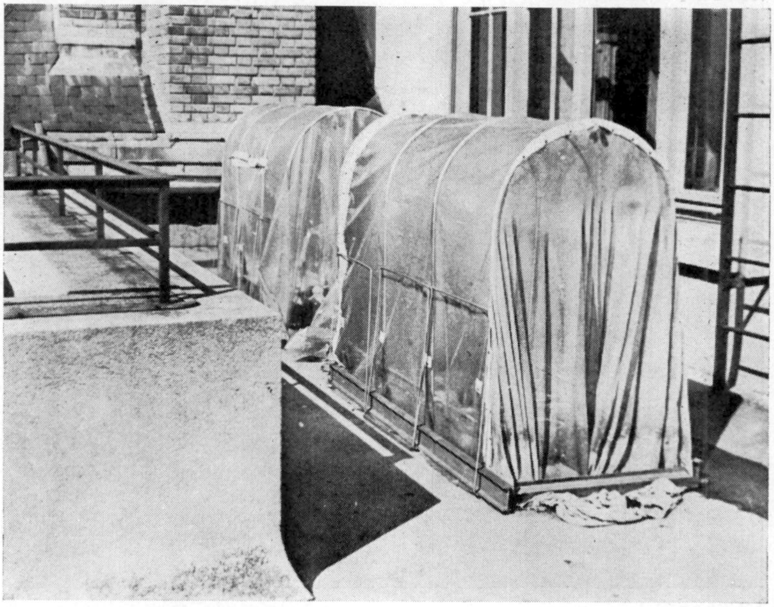


FIG. 5. — Culture aseptique en tubes (22 × 220 mm).

Le grain germé repose sur un tampon de coton cardé enfoncé au ras du liquide (solution minérale) réparti à raison de 20 ml par tube. On note que la plantule atteint le haut du tube (ceci après 8-10 j) : à ce moment le transfert doit être fait. Les racines sont protégées de la lumière par du papier noir.



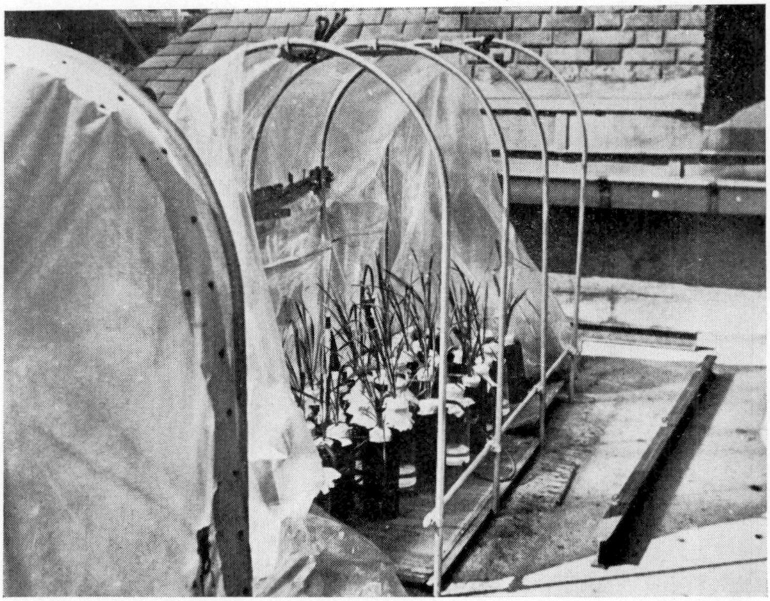


FIG. 6, 7. — Serres.

Elles sont constituées par un bâti de tubes métalliques recouverts d'une feuille de polyéthylène de 100 μ d'épaisseur. On voit que les deux extrémités sont fermées par un tulle grec pour moustiquaire facilitant les échanges gazeux.

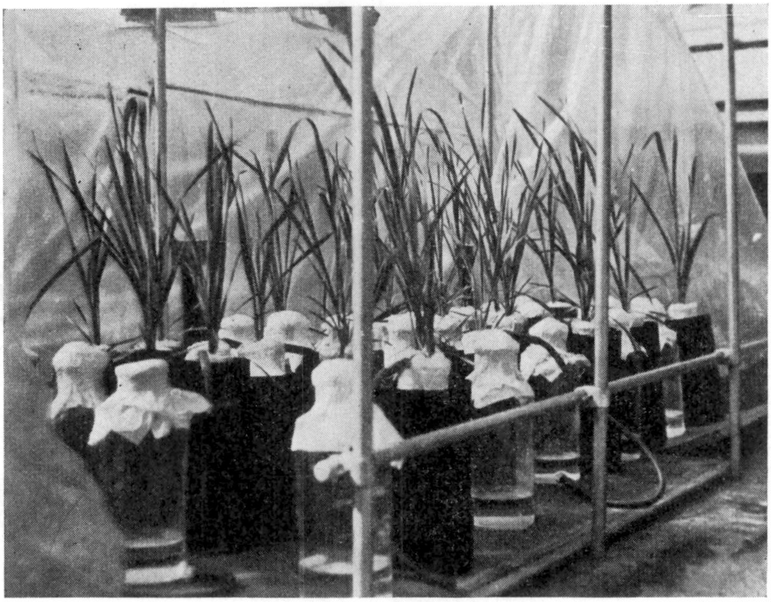


FIG. 8. — Détail d'une serre juste avant la fin de l'expérimentation.

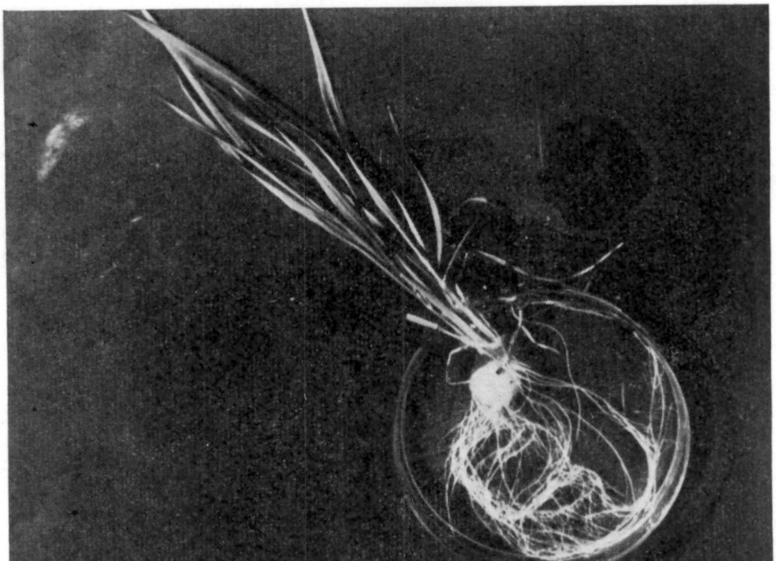
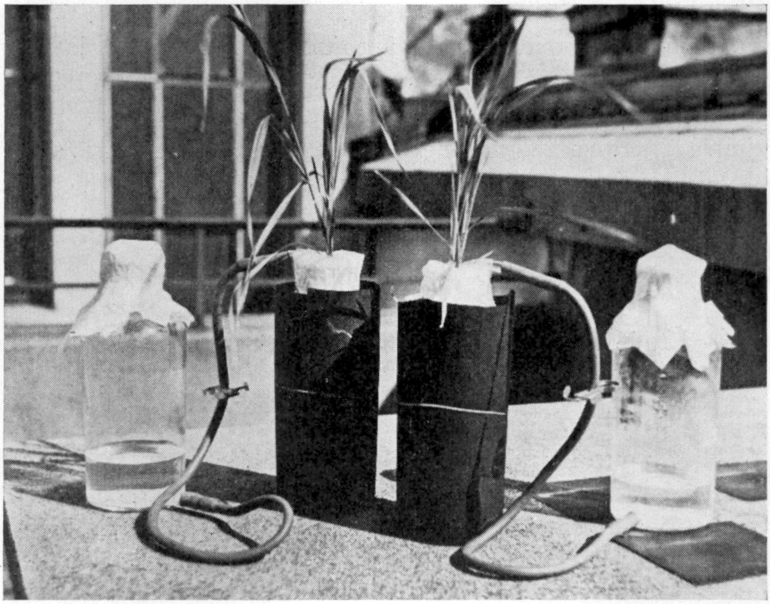


FIG. 9. — Aspect des racines du Blé cultivé aseptiquement (à la fin du tallage). On distingue le plateau de tallage au niveau du tampon de coton.



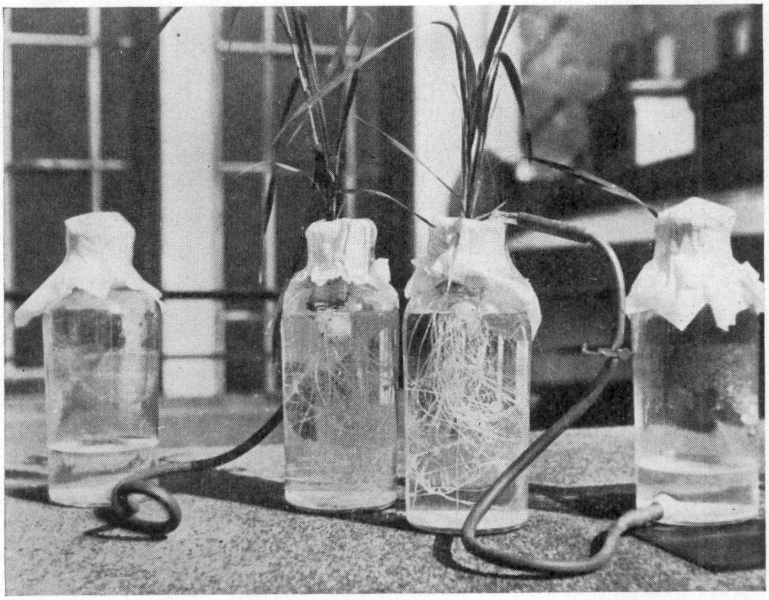


FIG. 10. 11. — Culture aseptique du Blé après transfert dans des fioles Pyrex (1 l., large ouverture).

On remarque le support en fil de fer qui retient le tampon de coton au niveau duquel se trouvait le grain germé ; il y repose actuellement le plateau de tallage. Les tiges sont maintenues par des tampons de coton cardé recouverts de papier sulfurisé ; on voit qu'il y a une légère ouverture permettant ainsi le passage d'un tube de verre relié par un tube de caoutchouc muni d'une pince à la partie inférieure d'une deuxième fiole. On peut alors aérer (après siphonage du liquide) et maintenir le niveau de la solution nutritive constamment à la hauteur du plateau de tallage. On recouvre les fioles de papier noir pour éviter l'action de la lumière sur les racines.

jours d'incubation, mais il disparaît rapidement et ne s'observe plus après vint-cinq jours. La limpidité du milieu nutritif, l'état sanitaire parfait des racines laissent penser que la desquamation est réduite au minimum ; la filtration ayant retenu les débris cellulaires, on peut, en première approximation, admettre que seules les excrétions radicellaires sont responsables de ce phénomène. La question se pose de savoir quelle est la composition biochimique des excrétions radicellaires du Blé à la fin du tallage.

III. — Étude biochimique des excrétions radicellaires du Blé.

1° Techniques employées.

Elles ont pour but de déterminer succinctement la composition biochimique des excrétions radicellaires d'une variété de Blé, *Fylgia*, cultivée aseptiquement dans un milieu liquide.

Après contrôle de l'asepsie, à la fin du tallage, au début de la montée, les plantes sont enlevées, les racines lavées, l'eau de lavage et la solution nutritive de trente fioles mélangées et filtrées après avoir amené le pH à 6,0

Une partie du mélange sert au dosage des acides volatils de la série grasse (72), le reste étant lyophilisé à —45°C. C'est dans le lyophilisat que l'on recherche quelques acides organiques non volatils (73, 74), les oses (75), les acides aminés et les amides (76), les nucléosides et les nucléotides (77) et certains facteurs de croissance (78).

Nous avons essayé de voir s'il n'y avait pas de substances inhibant les Bactéries cellulolytiques aérobies dans les excrétions radicellaires du Blé. Pour ce faire, on utilise des plaques de silico-gel (32) imprégné d'une certaine quantité du lyophilisat (0,5-1-2 g). Elles sont ensemencées avec des grains de terre ou des souches pures.

2° Résultats et discussion.

Ils sont donnés dans le tableau XIII.

Il y a en plus des traces de nucléotides, mais pas de vitamines du groupe B. Nous n'avons jamais observé de ralentissement de la croissance des souches pures inoculées sur silico-gel.

Par contre, les plaques ensemencées avec des grains de terre sont rapidement envahies par des Champignons.

En fait, les substances excrétées par les racines du Blé au moment du tallage présentent une certaine analogie avec ce que l'on sait du métabolisme de la plante à ce stade, d'après CARLES (79, 80, 81) ; parmi les acides organiques, le groupe le plus important est celui du cycle citrique et, dans celui-ci, l'acide malique en quantité notable, parmi les acides

aminés et les amides, l'acide glutamique, l'asparagine, la glutamine, l'alanine et l'acide γ-amino-butyrique, parmi les oses, le glucose et le raffinose.

TABLEAU XIII

Constitution biochimique des excrétions radicellaires du Blé (var. Fylgia) à la fin du tallage.

La teneur est exprimée en mg. par litre de solution nutritive correspondant à une plante.

Acides gras volatils	Acides organiques non volatils	Oses	Acides aminés et amides
Acétique : 13	Malique : 0,5	Glucose : 0,1	Acide glutamique : 0,012
Propionique : 3,5	Lactique : traces	Arabinose : traces	Acide cystéique : 0,005
Butyrique : 2	Tartrique : traces	Xylose : traces	Serine : 0,007
Valérianique : 1,5	Citrique : traces	Raffinose : traces	Glycine : 0,005
	Succinique : traces	Indéterminé : traces	Asparagine : 0,011
	Fumarique : traces		Thréonine : 0,010
	Glycolique : traces		Alanine : 0,011
	Indéterminé : traces		Glutamine : 0,013
			Acide γ aminobutyrique : 0,012
			Valine : 0,010
			Proline : 0,800
			Acide hydroxypipecolique : 0,015

CONCLUSIONS

Si les publications concernant l'étude de la rhizosphère sont nombreuses, une grande diversité de techniques, des interprétations différentes de résultats peu nets, voire contradictoires, ne permettent pas d'avoir des conclusions précises ; souvent les conditions expérimentales sont mal définies, la valeur statistique des résultats n'étant même pas discutée. Dans les conditions précisées, ce mémoire étudie l'effet rhizosphère du Blé à divers stades de sa croissance, et dégage un certain nombre de faits permettant de mieux comprendre le phénomène, que l'on peut résumer comme suit :

Première partie. — ÉTUDE MICROBIOLOGIQUE DE LA RHIZOSPHÈRE A DIVERS STADES DE LA CROISSANCE DU BLÉ.

1° **Vis-à-vis des groupes morphologiques** de micro-organismes du sol (Bactéries, Actinomycètes et Champignons), l'effet rhizosphère est toujours stimulant, avec un maximum à la fin du tallage.

Dans la *rhizosphère éloignée,* l'effet stimulant ne s'observe qu'à ce stade, alors que, dans la *rhizosphère proche,* le tallage, l'épiaison et la maturité sont accompagnés d'une action rhizosphère dont le maximum, très élevé à la fin du tallage, est peu durable : elle se stabilise dès l'épiaison

à des valeurs bien inférieures. Ces résultats apparaissent nettement distincts de ce que l'on pouvait attendre des conceptions classiques, d'autant plus que les Champignons sont beaucoup plus stimulés que les Actinomycètes ou que les Bactéries, alors que les autres auteurs, ayant négligé le stade du tallage, indiquaient un ordre inverse (que l'on retrouve ici à l'épiaison).

2° **Vis-à-vis des groupes physiologiques** étudiés caractérisant les cycles de l'azote et du carbone, l'*effet rhizosphère éloignée* ne se manifeste aussi qu'au moment du tallage. Il est toujours stimulant, presque tous les groupes subissent son action éphémère qui disparaît à l'épiaison. Il varie parallèlement à l'*effet rhizosphère proche*, mais d'une façon très atténuée, prouvant l'étroitesse de la zone d'action des racines dans le sol, car les conditions expérimentales amenaient une forte densité de racines par rapport à la terre. L'*effet rhizosphère proche* est soit stimulant, en général, soit inhibiteur dans le cas des Bactéries cellulolytiques aérobies ; d'autre part son maximum apparaît toujours à la fin du tallage, au début de la « montée », qui représente un stade particulièrement intéressant dans l'étude de l'effet rhizosphère, contrairement aux travaux antérieurs qui avaient situé l'action maximum lors de l'épiaison. Cet effet disparaît assez rapidement, car à maturité, même longtemps après, il est limité à quelques groupes et son intensité est faible.

3° **Pour une même variété de Blé, dans des sols distincts**, les rapports R/S caractérisant l'effet rhizosphère varient en sens inverse de la teneur en micro-organismes de la terre d'expérience ; si celle-ci est trop élevée, l'*effet rhizosphère éloignée* peut être masqué.

4° **Dans un même sol, avec des variétés ayant des aptitudes au tallage différentes**, l'effet rhizosphère est fonction du tallage ; si la variété étudiée ne talle pas, il n'y a plus aucune action décelable dans la *rhizosphère éloignée*. Dans le cas d'une même variété semée dans des conditions telles que le tallage soit plus ou moins important, l'effet rhizosphère varie comme le tallage : plus les talles sont nombreuses, plus les rapports R/S sont élevés.

Deuxième partie. — ÉTUDE DES EXCRÉTIONS RADICELLAIRES DU BLÉ A LA FIN DU STADE DU TALLAGE.

5° **Les excrétions radicellaires de la variété *Fylgia* cultivée aseptiquement dans une solution minérale jusqu'à la fin du tallage**, incorporées dans un limon argileux, réalisent, après incubation, une *rhizosphère artificielle* ayant des caractéristiques intermédiaires entre la *rhizosphère éloignée* et la *rhizosphère proche* d'une même plante cultivée dans la même terre jusqu'au même stade. La limpidité du milieu nutritif, l'état

sanitaire parfait des racines laissent penser que la desquamation est réduite au minimum ; la filtration ayant retenu les débris cellulaires, on peut admettre que seules les excrétions radicellaires sont responsables de ce phénomène. Le métabolisme des substances excrétées met en jeu les diverses microflores, mais l'action n'est pas explosive, elle est douce et progressive et se maintient assez longtemps. Comme, d'autre part, il n'y a pas d'effet rhizosphère net après le flétrissement et la mort de la plante, celui-ci peut s'expliquer presque uniquement par l'action des excrétions radicellaires.

En effet, ici les *Azotobacter* ne présentent aucune stimulation, ce qui peut suggérer que le métabolisme des cellules desquamées joue un rôle dans le cas des *Azotobacter* de la rhizosphère, peut-être par la libération de molécules trop grosses pour être excrétées, apportant des métabolites essentiels.

6° **L'étude biochimique des excrétions radicellaires de la variété** *Fylgia* **cultivée dans les mêmes conditions** montre qu'il y a un assez grand nombre de substances en quantité relativement importante. Ainsi, par plante, on trouve 20 milligrammes d'acides gras volatils (dont 65 p. 100 d'acide acétique), 2 milligrammes d'acides aminés (constitués de treize acides aminés et amides différents) et quelques dixièmes de milligramme d'oses et d'acides organiques accompagnés de traces de nucléotides. Ce sont surtout des molécules de faible poids moléculaire retrouvées aussi dans le métabolisme de la plante à ce stade.

Les résultats acquis dans ce travail permettent d'émettre les hypothèses suivantes qui complètent les arguments apportés par Lochhead et coll. (14, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43) sur les **groupes nutritionnels de Bactéries dans la rhizosphère.**

Ces excrétions radicellaires, par leur apport énergétique, conduisent à un développement intense des Bactéries ammonifiantes qui, après libération d'ammoniac, stimulent les nitrificateurs ; en présence d'azote nitrique, les Bactéries dénitrifiantes sont activées. La décomposition des substances organiques rapidement utilisées comme l'amidon est accompagnée par l'attaque des matières cellulosiques (amidon et cellulose provenant des cellules desquamées). Il y a alors une prolifération abondante de Champignons favorisée par l'excrétion d'acides organiques : ce phénomène expliquant l'inhibition des Bactéries cellulolytiques aérobies.

Donc, au voisinage des racines du Blé, à la fin du tallage, l'excrétion abondante de molécules diverses met en jeu tout un cycle de processus microbiologiques dont la signification physiologique n'est pas toujours exactement connue, mais qui ont un rôle important du point de vue agronomique. Ainsi, les micro-organismes de la rhizosphère activent certainement le *métabolisme de l'azote* (fixation, ammonification, nitrification et

dénitrification), particulièrement à la fin du tallage, quand le Blé a des besoins nutritifs considérables. Leur action solubilisante vis-à-vis des éléments minéraux s'ajoute à celle propre aux racines (dégagement de gaz carbonique et excrétion d'acides organiques). Ils jouent aussi probablement un rôle de mise en réserve dans le protoplasma bactérien de substances cellulaires qui serviront ensuite à la nutrition des plantes.

RÉSUMÉ

Dans des conditions expérimentales précises, ce travail a permis d'étudier l'effet rhizosphère du Blé et de dégager un certain nombre de faits intéressants qui n'avaient jamais été signalés auparavant, dont l'interprétation aide à mieux comprendre le phénomène. L'effet rhizosphère est maximum à la fin du tallage, notable à l'épiaison, faible ou nul aux autres stades, même après maturité ; il est stimulant pour tous les groupes de micro-organismes étudiés sauf pour la microflore cellulolytique qui est inhibée, d'autant plus élevé que le sol est moins riche en micro-organismes ou que la variété présente un tallage plus abondant. La zone d'action des racines est étroite, car l'effet rhizosphère éloignée est très atténué et ne s'observe pratiquement qu'au moment du tallage. Quand on incorpore dans de la terre uniquement les excrétions radicellaires du Blé à ce stade, à l'exclusion de tout élément desquamé, après incubation on réalise une rhizosphère artificielle ayant des caractéristiques intermédiaires entre la rhizosphère éloignée et la rhizosphère proche d'une culture identique en pot. Les résultats acquis dans cette étude complètent les arguments apportés par l'école canadienne (LOCHHEAD et ses collaborateurs) sur les groupes nutritionnels dans la rhizosphère, et permettent d'énoncer quelques hypothèses sur le rôle physiologique de ces micro-organismes après avoir analysé la composition biochimique des excrétions radicellaires du Blé (*var. Fylgia*).

SUMMARY

Study of the rhizosphere of wheat.

A study conducted under controlled conditions lead to so far unknown facts in respect of the effect of the rhizosphere of wheat, the interpretation of which promotes the unterstanding of this phenomenon.

The rhizosphere effect is strongest at the end of tillering, particularly at the time of ear formation and is weak or absent during other periods even after ripening ; except for cellulose-decomposing organisms which are inhibited, the stimulating effect of the rhizosphere on all other microbial groups increases with a decreasing microbial population of the soil and with an increasing abundance of tillering. The zone of action of the roots is rather restricted, since the effect of the distant rhizosphere is very weak and can be observed almost exclusively at the time of tillering.

If at this stage the soil is treated with the root excretions of wheat, without any exfoliated material, incubation will lead to an artificial rhizosphere showing characteristics that are intermediate between the effects of the distant and close rhizosphere of identical cultures in pots.

The results of the study complete the arguments of the Canadian school (Lochead *et al.*) on the nutritional groups in the rhizosphere, and the analysis of the biochemical composition of the root excretions of wheat (var. Fylgia) lead to certain hypotheses on the physiological role of these micro-organisms.

Изучение ризосферы пшеницы.

Ж. РИВЬЕР. Национальный Агрономический Институт. Париж.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Эта работа, произведенная в точных опытных условиях, позволила изучить эффект « ризосферы пшеницы » и выявить некоторое количество интересных фактов, до сих пор никогда не описанных, и объяснение которых помогает лучше понимать явление. Эффект « ризосфера » самый значительный проявляется в конце кущения; он значителен еще при выколашивании, между тем как он слаб или совершенно отсутствует в другие фазы, даже после созревания; он стимулирует все изученные группы микроорганизмов, за исключением целлюлозолитической микрофлоры, которая подавлена; он тем более значителен, чем почва более бедна микроорганизмами, или чем данная разновидность пшеницы имеет кущение более обильное. Зона действия корней узка, так как « эффект отдаленной ризосферы » сильно ослаблен и практически наблюдается только в период кущения.

Когда в почву вносятся только корневые выделения пшеницы в этот период, за исключением какого бы то было другого элемента растения, по, после инкубации, получают искусственную ризосферу, которая имеет характеристику промежуточную между отдаленной ризосферой и близкой ризосферой данной культуры в сосудах.

Результаты полученные в этом изыскании дополняют доводы канадской школы (Lochead и сотрудники), касающиеся питательных групп в ризосфере и позволяют сделать несколько гипотез насчет физиологической роли этих микроорганизмов, после того как были произведены анализы биохимического состава корневых выделений пшеницы (разновидность Фильжиа).

ZUSAMMENFASSUNG

Studien uber die Rhizosphäre des Weizens.

Unter präzisen Versuchsbedingungen, hat diese Arbeit es erlaubt, die Rhizosphärenwirkung des Weizens zu erforschen und hiermit eine gewisse Anzahl von interessanten Tatsachen, die bis heute noch nicht hervorgehoben wurden, festzulegen ; ihre Erklärung erlaubt diese Erscheinungen besser zu verstehen. Die Rhizosphärenwirkung ist maximal am Ende der Bestockung, ansehlich beim Ahrenschieben, schwach oder nicht anwesend bei anderen Stadien, selbst nach der Reife ; sie ist anregend für alle untersuchten Mikroorganismengruppen, mit Ausnahme der Zellulose-abbauenden Mikroflora welche durch dieselbe inhibiert wird ; je weniger der Boden reich an Mikroorganismen ist oder die Weizensorte eine reichlichere Bestockung zeigt, umso höher liegt die Rhizosphärenwirkung. Die Wirkungszone der Wurzeln ist begrenzt, denn

die Wirkung der fernen Rhizosphäre ist sehr abgeschwächt und ist praktisch nur im Zeitpunkt der Bestockung zu beobachten.

Wenn man dem Boden, alleinig Wurzelausscheidungen des in diesem Stadium sich befindenden Weizens zuführt, mit Ausnahme von jedem abgeblätterten Bestandteils, so ruft man, nach Inkubation, eine künstliche Rhizosphäre hervor, welche mittleren Karakteristiken entspricht und die zwischen einer entfernten Rhisosphäre und einer in Gefässkulturen identischen nahen Rhizosphäre liegen.

Die durch diese Studien erzielten Resultate ergänzen die von der kanadischen Schule (Lochhead u. Mitarbeiter) dargelegten Argumente über die in der Rhizosphäre vorhandenen nutritionnellen Gruppen ; sie erlauben nach Analyse der biochemischen Zusammensetzung der Weizenwurzelausscheidungen (Sorte Fylgia) einige Hypothesen über die physiologische Rolle dieser Mikroorganismen auszusprechen.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Hiltner (L.). — Ueber neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiet der Bodenbakteriologie und unter besonderer Berücksichtigung der Gründüngung und Brache. *Arb. Deut. Landw. Ges.*, **98**, 59, 1904.

(2) Starkey (R. L.). — Microscopic examination of the rhizosphere. *Soil Sci.*, **45**, 207, 1938.

(3) Linford (M. B.). — Methods of observing soil flora and fauna associated with roots. *Soil Sci.*, **53**, 93, 1942.

(4) Rovira (A. D.). — A study of the development of the root surface microflora during the initial stages of plant growth. *J. Appl. Bacteriol.*, **19**, 72, 1956.

(5) Starkey (R. L.). — Some influences of the development of higher plants upon the microorganisms in the soil. I. Historical and introductory. *Soil Sci.*, **27**, 319, 1929.

(6) Starkey (R. L.). — *Idem.* II. Influence of the stage of plant growth upon abundance of organisms. *Soil Sci.*, **27** 355, 1929.

(7) Starkey (R. L.). — *Idem.* III. Influence of the stage of plant growth upon some activities of the organisms. *Soil Sci.*, **27**, 433, 1929.

(8) Starkey (R. L.). — *Idem.* IV. Influence of proximity to roots on abundance and activity of microorganisms. *Soil Sci.*, **32**, 367, 1931.

(9) Starkey (R. L.). — *Idem.* V. Effects of plants upon distribution of nitrates. *Soil Sci.*, **32**, 395, 1931.

(10) Timonin (M. I.). — The interaction of higher plants and soil microorganisms. I. Microbial population of rhizosphere of seedlings of certain cultivated plants. *Can. J. Research, C*, **18**, 307, 1940.

(11) Zukovskaya (P. W.). — Changements dans la bactériorhize des plantes cultivées (en russe). *Mikrobiologiya*, **10**, 919, 1941.

(12) Katznelson (H.). — The rhizosphere effect of mangels on certain groups of microorganisms. *Soil Sci.*, **62**, 343, 1946.

(13) Balicka (N.). — Activité biologique comparée des rhizosphères du Seigle et de la Vesce en culture pure ou mixte. *Ann. Inst. Pasteur*, **95**, 480, 1958.

(14) Lochhead (A. G.). — Qualitative studies of soil microorganisms. III. Influence of plant growth on the character of the bacterial flora. *Can. J. Research, C*, **18**, 42, 1940.

(15) Daste (P.). — Recherches sur l'écologie bactérienne dans la rhizosphère de quelques plantes supérieures. *Thèse Sci. Paris*, 1956 ; publiée dans *Rev. Cytol. Biol. Vég.*, **19**, suppl. 1, 1958.

(16) THOM (C.) et HUMFELD (H.). — Notes on the associations of microorganisms and roots. *Soil Sci.*, **34**, 29, 1932.

(17) KRASSILNIKOV (N. A.). — Influence des excrétions radicellaires sur la croissance des *Azotobacter* et d'autres micro-organismes du sol (en russe). *Mikrobiologiya*, **3**, 343, 1934.

(18) KRASSILNIKOV (N. A.), KRISS (A. E.) et LITVINOV (M. A). — Caractéristiques microbiologiques de la rhizosphère des plantes cultivées (en russe). *Mikrobiologiya*, **5**, 87, 1936.

(19) OBRASTZOVA (A. A.). — Les micro-organismes de la rhizosphère dans les sols rouges de Batoum (en russe). *Doklady Akad. Nauk. S. S. S. R.*, **1**, 70, 1935.

(20) MANZON (V. D.). — Influence of higher plants on the microflora of soil, 1936. [Publication non consultée : d'après KATZNELSON (H.), LOCHHEAD (A. G.) et TIMONIN (M. J.). — Soil microorganisms and the rhizosphere. *Bot . Rev.*, **14**, 543.], 1948.

(21) BEREZOVA (F. F.). — Microflore de la rhizosphère du Lin (en russe). *Mikrobiologiya*, **10**, 918, 1941.

(22) ADATI (M.). — Untersuchungen über die Rhizosphäre der Pflanzen. *J. Soc. Trop. Agr.* (Taiwan), **11**, 57, 1939. [Publication non consultée : d'après KATZNELSON (H.), LOCHHEAD (A. G.) et TIMONIN (N. J.). Soil micro-organisms and the rhizosphere. *Bot. Rev.*, **14**, 543], 1948.

(23) CLARK (F. E.) — Notes on types of bacteria associated with plant roots. *Trans. Kansas Acad. Sci.*, **43**, 75, 1940.

(24) FEDOROV (M. V.) et NEPOMILOVEV (V. P.). — Multiplication et activité azotofixatrice dans la rhizosphère des herbes vivaces (en russe). *Mikrobiologiya*, **23**, 275, 1954.

(25) POCHON (J.) et BARJAC (H. DE). — Recherches sur la rhizosphère du Maïs. Action des fumures minérales et organiques. *Rapp. VI^e Congr. Intern. Sci. Sol, Paris*, **3**, 287, 1956.

(26) KATZNELSON (H.), ROUATT (J. W.) et PAYNE (T. M. B.). — Recent studies on the microflora of the rhizosphere. *Rapp. VI^e Congr. Intern. Sci. Sol, Paris*, **3**. 151, 1956.

(27) TIMONIN (M. I.). — The interaction of higher plants and soil microorganisms. *Thesis. Rutgers Univ*, 1939.

(28) WEST (P. M.) et HILDEBRAND (A. A.). — The microbiological balance of strawberry root rot soil as related to the rhizosphere and decomposition effects of certain cover crops. *Can. J. Research, C*, **19**, 199, 1941.

(29) CLARK (F. E.). — Soil microorganisms and plant roots. *Advances in Agron.*, **1**, 241, 1949.

(30) KATZNELSON (H.) et RICHARDSON (L. T.). — Rhizosphere studies and associated microbiological phenomena in relation to strawberry root rot. *Sci. Agric.*, **28**, 293, 1948.

(31) GYLLENBERG (H. G.). — Nutritional characteristics of non-sporogenous bacteria associated with the roots. *Physiol. Plantarum*, **9**, 119, 1956.

(32) WINOGRADSKY (S.). — Microbiologie du sol. Problèmes et méthodes. Cinquante ans de recherches. *Masson* éd., Paris, 1949.

(33) SHELOUMOVA (A.) et MENKINA (P.). — Les plantes supérieures comme source d'aliments pour les *Azotobacter* (en russe). *Mikrobiologiya*, **8**, 2, 1936.

(34) KRASSILNIKOV (N. A.). — Microflore du sol et influence des plantes (en russe). *Mikrobiologiya*, **13**, 187, 1944.

(35) LOCHHEAD (A. G.). — Qualitative studies of soil microorganisms. XV. Capability of the predominant bacterial flora for synthesis of various growth factors. *Soil Sci.*, **84**, 395, 1957.

(36) LOCHHEAD (A. G.) et BURTON (M. O.). — Qualitative studies of soil microorganisms. XII. Characteristics of vitamin B_{12}-requiring bacteria. *Can. J. Microbiol.*, **1**, 319, 1955.

(37) LOCHHEAD (A. G.) et BURTON (M. O.). — Qualitative studies of soil microorganisms. XIV. Specific vitamin requirements of the predominant bacterial flora. *Can. J. Microbiol.*, **3**, 35. 1957.
(38) LOCHHEAD (A. G.) et CHASE (F. E.). — Qualitative studies of soil microorganisms. V. Nutritional requirements of the predominant bacterial flora. *Soil Sci.*, **55**, 185, 1943.
(39) LOCHHEAD (A. G.) et THEXTON (R. H.). — Qualitative studies of soil microorganisms. VII. The rhizosphere effect in relation to the amino acid nutrition of bacteria. *Can. J. Research, C.* **25**, 20, 1947.
(40) LOCHHEAD (A. G.) et THEXTON (R. H.). — Qualitative studies of soil microorganisms. X. Bacteria requiring vitamin B_{12} as growth factor. J. *Bacteriol.*, **63**, 219, 1952.
(41) WALLACE R. H.) et LOCHHEAD (A. G.). — Qualitative studies of soil microorganisms. VIII. Influence of various crop plants on the nutritional groups of soil bacteria. *Soil Sci.*, **67**, 63, 1949.
(42) WALLACE (R. H.) et LOCHHEAD (A. G.). — Qualitative studies of soil microorganisms. IX. Amino acid requirements of rhizosphere bacteria. *Can. J. Research.* C. **28**, 1, 1950.
(43) WEST (P. M.) et LOCHHEAD (A. G.). — Qualitative studies of soil microorganisms. IV. The rhizosphere in relation to the nutritive requirements of soil bacteria. *Can. J. Research, C,* **18**, 129, 1940.
(44) MICHAEL (G.) et MARSCHNER (H.). — Recherche avec P_{32} sur l'excrétion de phosphore par les racines (en allemand). *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, **80**, 1, 1958.
(45) FEDOROVSKII (D. V.). — Excrétion de phosphore et de calcium marqués par les racines dans le sol (en russe). *Pochvovedenie,* **3**, 17, 1958.
(46) THOM (C.). — Micropopulation correlated to decomposition processes. *Trans. 3rd. Int. Congr. Soil Sci., Oxford,* **1**, 160, 1935.
(47) METZ (H.). — Recherches sur la rhizosphère (en allemand). *Arch. Mikrobiol.*, **23**, 297, 1955.
(48) VOZNIAKOVSKAIA (Y. M.). — Influence du système radicellaire du Blé sur la microflore du sol (en russe). *Mikrobiologiya,* **17**, 458, 1948.
(49) BURKHARD (F.). — Excrétion d'acides aminés et d'amides dans le milieu nutritif par les racines d'*Helianthus annuus* (en allemand). *Planta,* **49**, 210, 1957.
(50) ROVIRA (A. D.). — Plant root excretions in relation to the rhizosphere effect. I. The nature of root exudate from oats and peas. *Plant and Soil,* **7**, 179, 1956.
(51) ROVIRA (A. D.). — *Idem.* II. A study of the properties of root exudate and its effect on the growth of microorganisms isolated from the rhizosphere and control soil. *Plant and Soil,* **7**, 195, 1956.
(52) ROVIRA (A. D.). — *Idem.* III. The effect of root exudate on the numbers and activity of microorganisms in soil. *Plant and Soil,* **7**, 209, 1956.
(53) NILSSON (P. E.). — Influence of crop on biological activities in soil. *Kgl. Lantbruks-Högskol. Ann.*, **23**, 175, 1957.
(54) KANDLER (O.). — Papierchromatographischer Nachweis der Aminosäureausscheidung *in vitro* Kultivierter Maiswurzeln. *Z. Naturforsch.*, **66**, 437, 1951.
(55) VIRTANEN (A. I.) et LAINÉ (T.). — Chemical nature of the aminoacids excreted by leguminous root nodules. *Biochem. J.*, **33**, 412, 1939.
(56) LUNDEGARD (H.) et STENLID (G.). — On the exsudation of nucleotides and flavanone from living roots. *Ark. Bot.*, **31**, 1, 1944.
(57) FORSMAN (B.). — *Thèse.* Institut de Botanique physiologique. Université d'Upsala. 1955 [Publication non consultée : d'après ROVIRA (A. D.). — Plant root excretions in relation to the rhizosphere effect. *Plant and soil,* **7**, 179, 1956].
(58) BROWN (R.), ROBINSON (E.) et JOHNSON (A. W.). — The effect of

d.-xylocetose and certain root exsudates in extension growth. *Proc. Roy, Soc.* (London), B, **136**, 577, 1949.

(59) Bhuvaneswari (K.) et Subba Rao (N. S). — Root exudates in relation to the rhizosphere effect. *Proc. Indian Acad. Sci.*, **45**, 299, 1957.

(60) Dehay (C.) et Carré (M.). — Etude de la composition de quelques excrétions radicellaires. *C. R. Acad. Sci.*, **244**, 230, 1957.

(61) West (P. M.). — Excretion of biotine and thiamine by roots of higher plants. *Nature*, **144**, 1050, 1939.

(62) Meshkov (N. V.). — Facteurs de croissance pour les micro-organismes dans les sécrétions radicellaires des plantes (en russe). *Zhur. Obshcher Biol.*, **13**, 76, 1952.

(63) Ratner (E. I). — Sur l'activité vitale des systèmes radiculaires dans ses relations avec la nutrition hétérotrophe des Phanérogames et le rôle des micro-organismes. *Acad. Sci. U. R. S. S., Soc., Bot. U. R. S. S.*, Essais de Botanique, **2**, 706, 1954.

(64) Pochon (J.) et Barjac (H. de). — Traité de Microbiologie des sols. *Dunod* éd., Paris, 1958.

(65) Timonin (M. I.). — The effect of by-products of plant growth on the activity of fungi and actinomycetes. *Soil Sci.*, **52**, 395, 1941.

(66) Pochon. (J.) — Manuel technique d'analyse microbiologique du sol. *Masson* éd. Paris, 1954.

(67) Demolon (A.). — Principes d'Agronomie. I. Dynamique du sol. *Dunod* éd., Paris, 1952.

(68) Mc Crady (M. H.). — Tables for rapid interpretation of fermentation tube results. *Can. Pub. Health J.*, **9**, 201, 1918.

(69) Stearman (R. L.). — Statistical concepts in Microbiology. *Bacteriol. Revs.*, **19**, 160, 1955.

(70) Sappa (F.). — La mycoflore du sol comme élément structurel des communautés végétales. *Rapp. VI[e] Congr. Intern. Sci. Soil, Paris*, **3**, 57, 1956.

(71) Jonard (P.). — Les Blés tendres cultivés en France. *I. N. R. A.*, éd., Paris, 1951.

(72) Paech (K.) et Tracey (M. V.). — Modern Methoden der Pflanzenanalyse. *Springer* éd., Berlin, 1955.

(73) Cheftel (R. I.), Munier (R.) et Machebœuf (M.). — Microchromatographie sur papier des acides aliphatiques hydrosolubles et non volatils. I. *Bull. Soc. Chim. Biol.*, **33**, 840, 1951.

(74) Cheftel (R. I), Munier (R.) et Machebœuf (M.). — *Idem.* II. Utilisation d'une phase solvante alcaline puis d'une phase solvante acide pour la microchromatographie à deux dimensions. *Bull. Soc. Chim. Biol.*, **34**, 380, 1952.

(75) Hirst (E. L.) et Jones (J. K. R.). — Chromatographic analyses. *Discuss. Faraday Soc.*, **7**, 268, 1949.

(76) Fauconneau (G.). — Les fractions azotées des plantes fourragères : l'azote non protéique (non publié : communication personnelle), 1958.

(77) Hurlbert (R. B.) et Potter (van R.). — Nucleotide metabolism. II. Chromatographic separation of acid-soluble nucleotides. *J. Biol. Chem.*, **209**, 23, 1954.

(78) Adrian (J.). — Méthodes de dosage des principales vitamines hydrosolubles. *Ann. Zootech.*, **4**, 295, 1956.

(79) Carles (J.). — Les glucides du Blé. *C. R. Acad. Sci.*, **241**, 1329, 1957.

(80) Carles (J.). — Les acides aminés libres du Blé. *C. R. Acad. Sci.*, **244**, 110, 1957.

(81) Carles (J.) et Bourguet (M.). — Les acides organiques du Blé. *C. R. Soc. Biol.*, **111**, 383, 1955.

(82) *Bulletin de la statistique départementale* (Préfecture de la Seine). 1956-1957-1958.

631. 811. + 631. 483

ROLE VECTEUR DE DIVERS ANIONS MINÉRAUX OU ORGANIQUES DANS LES PHÉNOMÈNES GÉOCHIMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES

QUATRIÈME MÉMOIRE

PAR

E. M. BASTISSE
Laboratoire des Sols, Versailles

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Introduction

II. — Évolution des complexes siliciques du fer ferreux, du fer ferrique et de l'aluminium sous forme de floculats :

Technique expérimentale.

a) Étude des solutions obtenues.
b) Étude des produits floculés.

III. — Évolution des complexes ferro et ferri siliciques sous forme de poudres :

Technique expérimentale.

a) Étude des solutions obtenues.
b) Étude des complexes poudres avant et après lavages.

IV. — Passage en solution du fer ferrique introduit sous différentes formes :

Technique expérimentale.

a) Étude des essais en l'absence de terre.
b) Étude des essais en présence de terre.

V. — Action physiologique de quelques pseudo solutions de complexes métallo-siliciques sur des cultures expérimentales dans différentes conditions de milieu.

VI. — Conclusions.

VII. — Bibliographie.

Notes analytiques — Dosages colorimétriques de SiO^2 et de Fe.

I. — INTRODUCTION

Nous avons étudié précédemment (1,2,3,4,5,6) les complexes colloïdaux métalliques électronégatifs ou neutres que l'on peut obtenir avec tous les métaux et en particulier avec le fer (ferreux ou ferrique), où la silice est l'agent de protection.

Cette silice joue le rôle de vecteur et maintient le fer en solution ce qui permet aux complexes d'assurer la nutrition ferrique des végétaux.

Le présent mémoire a pour but :

1° D'étudier l'action de lavages successifs, de façon à nous rendre compte de la manière dont se comportent, en présence d'eau de pluie, les complexes ajoutés dans le sol sous forme de floculats ou de poudres.

2° De préciser dans quelles conditions il est possible, grâce à ces complexes, d'augmenter la teneur des solutions du sol en fer afin de faciliter la nutrition des végétaux en cet élément.

Nous présentons en fin de ce mémoire les résultats obtenus dans une expérience de Physiologie Végétale où nous avons utilisé différents complexes métallosiliciques.

Les déterminations analytiques ont été faites : Pour SiO_2 : gravimétriquement et colorimétriquement par la méthode silicomolybdique. Pour Fe : Certaines déterminations ont été faites gravimétriquement et les autres colorimétriquement par la méthode à l'Ortho-Phénanthroline.

En annexe, on trouvera les enseignements pratiques que nous avons pu dégager des nombreux dosages de SiO_2 et Fe effectués au cours de ce travail.

II. — ÉVOLUTION DES COMPLEXES SILICIQUES DU FER FERREUX, DU FER FERRIQUE ET DE L'ALUMINIUM SOUS FORME DE FLOCULATS

Le but de ces essais est de provoquer par des lavages successifs, et aussi rapidement que possible, des modifications de composition dans les floculats, comparables à celles qui doivent avoir lieu dans le sol sous l'influence des eaux de pluie.

Technique Expérimentale

1° Préparation des floculats.

Dans 4 séries de bocaux de 5 litres, on place :

1° Un même volume de pseudo solution de complexe ferro-silicique correspondant à 2 g de Fer métal à l'état ferreux.

2° Un même volume de pseudo solution de complexe ferri silicique correspondant à 2 g de Fer métal à l'état ferrique.

3° Un même volume de pseudo solution du complexe alumino silicique correspondant à 1 g d'aluminium.

Dans ces trois séries d'essais, la quantité de SiO_2 introduite correspond à un rapport moléculaire : $SiO_2/2\,FeO$ (ou Fe_2O_3 ou Al_2O_3) = environ 12.

4° Une quantité de SiO_2 à l'état de silicate alcalin égale à celle utilisée pour la préparation des pseudo-solutions.

Le volume des pseudo-solutions est amené à environ 4 l 500 avec de l'eau ordinaire. Le pH est ajusté à 7,0 par addition de SO_4H_2 dilué. On ajoute sous forme de solution concentrée neutre 50 g de chlorure de calcium. Après avoir complété à 5 l avec de l'eau ordinaire (amenée à pH = 7,0), nous agitons à différentes reprises les essais ainsi préparés.

Il se produit, si on agite suffisamment, une floculation qui devient totale en 48 heures.

2° *Lavages.*

Un bocal de chaque série restera sans aucun traitement. Pour les autres, après dépôt du floculat, on décante et complète à 5 litres avec de l'eau ordinaire (amenée à pH 7,0 par SO_4H_2 dilué).

Après agitation et repos, on décante à nouveau le liquide. On répète ces lavages de la façon suivante pour les 4 séries :

Pour le bocal n° 1 = 0 lavage
Pour le bocal n° 2 = 10 lavages
Pour le bocal n° 3 = 30 lavages
Pour le bocal n° 4 = 80 lavages
Pour le bocal n° 5 = 160 lavages
Pour le bocal n° 6 = 240 lavages

Après la dernière décantation, les floculats sont lavés par centrifugation à l'eau distillée (jusqu'à élimination des sels solubles) puis séchés et broyés.

a) **Étude des solutions obtenues.**

Pour toutes les séries, les teneurs en SiO_2 des solutions sont très élevées pour les premiers lavages — de 50 à 70 mg SiO_2 par litre ; elles diminuent ensuite pour devenir de l'ordre de celles que l'on rencontre dans les eaux de drainage des sols — 10 mg SiO_2 par litre en moyenne.

Les choses se passent de la même façon pour Fe_2, Fe_3 et Al_3 avec des teneurs bien plus faibles mais qui cependant passent :

de 2 mg 000 à 0 mg 150 Fe par litre pour Fe_2
de 0 mg 400 à 0 mg 200 Fe par litre pour Fe_3
de 0 mg 600 à 0 mg 250 Al par litre pour Al_3

Les rapports moléculaires $SiO_2/2\ FeO$ (ou Fe_2O_3 ou Al_2O_3) sont toujours bien plus élevés dans les solutions que dans les floculats eux-mêmes.

b) **Étude des produits floculés.**

L'action des lavages qui éliminent surtout de la Silice se répercute sur la composition des floculats.

Le tableau I indique la composition chimique pour cent des produits séchés à 105°.

TABLEAU I

Analyses des Complexes Siliciques en p. 100 sur produits séchés à 105°

Nombre de lavages après floculation	0	10	30	80	160	240
			Complexe Ferro-Silicique.			
H_2O et Pertes au rouge	7,31	7,90	9,51	11,99	15,61	16,45
SiO_2	69,88	66,46	57,68	46,88	37,67	35,77
Fe_2O_3	20,28	22,67	28,89	38,62	44,50	46,12
CaO	1,20	2,06	2,94	1,90	1,25	1,09
MgO	0,05	0,09	0,19	0,13	0,09	0,07
K_2O	0,29	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	99,01	99,25	99,28	99,59	99,19	99,57
			Complexe Ferri-Silicique.			
H_2O et Pertes au rouge	8,88	10,27	11,36	12,36	14,55	15,88
SiO_2	64,31	58,47	52,07	40,24	30,26	28,04
Fe_2O_3	22,92	28,45	33,94	45,60	53,55	55,18
CaO	2,84	1,90	1,74	1,06	0,61	0,42
MgO	0,04	0,06	0,07	0,06	0,05	0,04
K_2O	0,06	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08
	99,59	99,20	99,24	99,39	99,10	99,64
			Complexe Alumino-Silicique.			
H_2O et Pertes au rouge	12,08	12,16	12,50	13,37	15,08	18,68
SiO_2	64,27	65,00	63,49	61,82	58,42	54,75
Al_2O_3	14,90	16,06	17,50	19,40	21,94	23,25
CaO	6,38	5,33	5,23	4,11	3,62	2,78
MgO	0,04	0,05	0,09	0,06	0,06	0,06
K_2O	1,80	0,51	0,39	0,25	0,22	0,17
	99,47	99,11	99,20	99,01	99,34	99,69
			Silicate alcalin.			
H_2O et Pertes au rouge	4,85	4,95	5,12	5,69		
SiO_2	92,20	92,25	91,84	89,27		
$Fe_2O_3 + Al_2O_3$	1,08	1,44	1,88	3,74		
CaO	0,80	0,21	0,21	0,20		
MgO	0,03	0,04	0,04	0,03		
K_2O	0,19	0,12	0,11	0,10		
	99,15	99,01	99,20	99,03		

Avec le nombre des lavages, on voit que :

SiO_2 diminue beaucoup pour les complexes ferro et ferri-siliciques, et un peu moins pour le complexe alumino-silicique.

Les oxydes métalliques augmentent souvent du simple au double. Il en est de même pour H_2O (et pertes au rouge).

Les bases CaO, MgO, K_2O tendent à diminuer (particulièrement CaO et K_2O).

Dans le tableau II, nous indiquons les rapports moléculaires correspondants pour M_2O_3 (2 FeO, ou Fe_2O_3 ou Al_2O_3) = 1,00.

TABLEAU II

Complexes siliciques — Rapports moléculaires

Nombre de lavages après floculation	0	10	30	80	160	240
			Complexe Ferro-Silicique.			
H_2O et Pertes au rouge	3,20	3,10	2,92	2,76	3,05	3,17
SiO_2	9,19	7,82	5,32	3,24	2,26	2,07
Fe_2O_3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CaO	0,17	0,26	0,29	0,14	0,08	0,07
MgO	0,010	0,015	0,026	0,013	0,008	0,006
K_2O	0,025	0,006	0,004	0,003	0,003	0,003
			Complexe Ferri-Silicique.			
H_2O et Pertes au rouge	3,44	3,21	2,98	2,41	2,42	2,56
SiO_2	7,49	5,48	4,09	2,35	1,51	1,36
Fe_2O_3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CaO	0,35	0,19	0,15	0,06	0,03	0,02
MgO	0,007	0,008	0,008	0,005	0,004	0,003
K_2O	0,045	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
			Complexe Alumino-Silicique.			
H_2O et Pertes au rouge	4,59	4,30	4,05	3,90	3,89	4,56
SiO_2	7,33	6,88	6,17	5,42	4,53	4,00
Al_2O_3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CaO	0,78	0,60	0,54	0,38	0,30	0,22
MgO	0,007	0,008	0,013	0,008	0,007	0,007
K_2O	0,130	0,035	0,024	0,014	0,011	0,008
			Silicate alcalin.			
H_2O et Pertes au rouge	32,47	25,00	19,89	11,09		
SiO_2	185,13	139,77	107,04	52,20		
$Fe_2O_3 + Al_2O_3$	1,00	1,00	1,00	1,00		
CaO	1,71	0,33	0,26	0,13		
MgO	0,08	0,09	0,07	0,03		
K_2O	0,24	0,12	0,08	0,04		

Pour la série 1 (2 FeO), la série 2 (Fe_2O_3), la série 3 (Al_2O_3), les rapports moléculaires SiO_2/M_2O_3 baissent en fonction du nombre des lavages. Cet abaissement est de même ordre pour les complexes ferro et ferri siliciques. Il est bien plus lent avec le complexe alumino-silicique.

Les rapports moléculaires H_2O (et pertes au rouge)/M_2O_3 s'abaissent légèrement au début, puis tendent à redevenir identiques à ce qu'ils étaient, tout particulièrement pour les complexes ferro et alumino siliciques après 240 lavages.

Les rapports moléculaires CaO et O/M_2OK_{23} s'abaissent assez rapidement sans jamais devenir égal à 0. De même, pour MgO qui est présent dans le milieu à l'état d'impureté.

Dans la 4[e] série, les oxydes métalliques qui y apparaissent proviennent d'impuretés amenées au cours des opérations de lavage à l'eau ordinaire qui cède au floculat de SiO_2, les oxydes métalliques (du fer et de l'aluminium) qu'elle contient.

On y voit se former progressivement des associations de $SiO_2 + M_2O_3$ (2 FeO ou Fe_2O_3 ou Al_2O_3), qui par un processus inverse à celui des 3 autres séries donnent des produits complexes présentant des rapports moléculaires SiO_2/M_2O_3, qui tendent à se rapprocher et iront jusqu'à s'identifier à ceux obtenus précédemment.

III. — ÉVOLUTION DES COMPLEXES FERRO ET FERRI-SILICIQUES SOUS FORME DE POUDRES

Nous avons fait une expérience de même genre sur des complexes utilisés sous forme de poudres.

Technique Expérimentale

1° Préparation des poudres.

Des floculats obtenus comme précédemment et lavés juste ce qu'il faut pour éliminer les agents floculants sont centrifugés, séchés à l'air, puis broyés.

2° Lavages.

Dans deux séries de bocaux de 5 litres, nous introduisons les poids de poudres indiqués au tableau IV des 3 complexes suivants :

— n° 1 : ferro-silicique à rapport moléculaire $SiO_2/2\ FeO = 17{,}30$

— n° 2 : ferri-silicique à rapport moléculaire $SiO_2/Fe_2O_3 = 13{,}74$

— n° 3 : ferri-silicique à rapport moléculaire $SiO_2/Fe_2O_3 = 6{,}60$

Série A. — Nous ajoutons 5 litres d'eau ordinaire, puis après agitation pour assurer un contact intime, des poudres et de l'eau, nous laissons déposer un temps suffisamment long pour obtenir des solutions claires.

On décante alors 4 litres de cette solution que nous remplaçons par 4 litres d'eau ordinaire ; nous agitons et laissons déposer à nouveau et décantons 4 litres de solution claire.

Nous faisons ainsi 20 lavages successifs à l'eau ordinaire. Dans les différentes solutions obtenues, on a dosé SiO_2 et Fe (tableau III). Les résidus des complexes après lavages ont été recueillis, séchés à l'air, pesés et analysés (tableau IV).

TABLEAU III

a) Etude des Solutions obtenues

	Eaux utilisées pour les lavages			Complexe n° 1 Ferro-Silicique à Rapport moléculaire initial $SiO_2/2\ FeO = 17{,}30$			Complexe n° 2 Ferri-Silicique à Rapport moléculaire initial $SiO_2/Fe_2O_3 = 13{,}74$			Complexe n° 3 Ferri-Silicique à Rapport moléculaire initial $SiO_2/Fe_2O_3 = 6{,}60$		
	SiO_2 en mg p. l	Fe en mg p. l	Rapports molécu-laires $SiO_2/2$ Fe	SiO_2 en mg p. l	Fe en mg p. l	Rapports molécu-laires $SiO_2/2$ Fe	SiO_2 en mg p. l	Fe en mg p. l	Rapports molécu-laires $SiO_2/2$ Fe	SiO_2 en mg p. l	Fe en mg en	Rapports molécu-laires $SiO_2/2$ Fe
Séries A :												
Sur les 10 premiers lavages à l'eau ordinaire.												
Minima	9,9	0,160		18,2	0,080		13,8	0,070		14,2	0,070	
Maxima	12,5	0,290		71,7	0,140		53,1	0,150		42,7	0,190	
Moyennes	11,26	0,190	111,0	42,32	0,100	792,5	33,71	0,104	604,1	29,10	0,107	510,5
Sur les 10 lavages suivants à l'eau ordinaire.												
Minima	8,6	0,150		9,5	0,110		8,3	0,120		8,7	0,130	
Maxima	10,6	0,240		13,4	0,190		11,8	0,210		13,4	0,210	
Moyennes	9,42	0,198	88,7	11,16	0,150	138,8	9,67	0,158	114,3	10,26	0,179	106,8
Séries B :												
Sur les 10 premiers lavages à l'eau échangée.												
Minima	6,2	0,040		18,6	0,160		15,8	0,300		21,3	0,200	
Maxima	9,4	0,150		71,2	0,430		57,2	0,530		40,2	0,490	
Moyennes	8,12	0,092	165,0	43,19	0,257	308,9	35,38	0,427	154,7	31,5	0,301	195,1
Sur les 10 lavages suivants à l'eau distillée.												
Minima				3,4	0,150		3,8	0,160		4,9	0,220	
Maxima				8,8	0,240		8,0	0,500		11,2	0,580	
Moyennes				5,81	0,193	56,3	5,72	0,295	36,2	7,54	0,351	40,1

Série B. — Notre intention initiale était de faire 20 lavages à l'eau distillée. Par suite d'une erreur, les 10 premiers lavages ont été faits à l'eau échangée et ce n'est que les 10 derniers qui ont été effectués à l'eau distillée (tableaux III et IV).

Nous avons obtenu les résultats suivants :

a) **Étude des solutions obtenues** (Tableau III).

Série A. — L'eau ordinaire utilisée contient de la Silice et du Fer.

Le lavage des complexes avec cette eau enlève des quantités appréciables de SiO_2 et tend à leur abandonner des quantités minimes de Fe. Ceci se rapproche de ce que nous avons déjà constaté pour le lavage des floculats ferro, ferri et alumino-siliciques et particulièrement dans le cas d'un floculat de SiO_2 qui, par lavages à l'eau ordinaire, abandonne SiO_2 et tend à s'enrichir en Fe_2O_3 (et Al_2O_3).

Série B. — L'eau échangée utilisée pour les 10 premiers lavages contient également SiO_2 et Fe.

Mise au contact des complexes, elle voit sa teneur en SiO_2 augmenter de 4 à 5 fois par rapport à son titre initial et sa teneur en Fe augmenter pour devenir de 2 fois 1/2 à 5 fois plus forte.

Les rapports $SiO_2/2$ FeO (ou Fe_2O_3) de la solution tendent à s'élever.

L'emploi de l'eau distillée pour les 10 lavages suivants donne des solutions contenant des quantités de SiO_2 et de Fe plus faibles que précédemment, mais non négligeables puisque pour l'ensemble des 10 solutions étudiées, elles varient de :

3 mg 4 à 11 mg 2 SiO_2 par litre
et de 0 mg 150 à 0 mg 580 Fe par litre.

b) **Étude des poudres** (Tableau IV)

Série A. — (20 lavages à l'eau ordinaire).

Pour les 3 complexes, on constate un abaissement des teneurs d'environ 50 p. 100 pour SiO_2 et de 10 à 20 p. 100 pour le Fer (exprimé en Fe_2O_3). MgO diminue un peu et K_2O tend à disparaître.

Par contre, la teneur en CaO a été multipliée par 3 et les pertes de 105° à 1000° par 2,0 à 2,5. Ces pertes de 105° à 1 000° correspondent pour une part à l'eau de constitution, mais également au CO_2 du calcaire de l'eau ordinaire qui s'est déposé sur les complexes.

Pour les rapports moléculaires pour Fe_2O_3 = 1,00, ces variations se traduisent ainsi :

SiO_2 : abaissement d'environ 40 p. 100.

MgO: variations faibles en plus ou en moins.

K_2O : très notables abaissements.

TABLEAU IV. — *Étude des complexe poudres avant et après lavages*

	Complexe n° 1 Ferro-Silicique			Complexe n° 2 Ferri-Silicique			Complexe n° 3 Ferri-Silicique		
	Produit introduit	Produits retrouvés après avoir été lavés: 20 fois à l'eau ordinaire, Série A	Produits retrouvés après avoir été lavés: 10 fois à l'eau échangée et 10 fois à l'eau distillée, Série B	Produit introduit	Produits retrouvés Après avoir été lavés: 20 fois à l'eau ordinaire, Série A	Produits retrouvés Après avoir été lavés: 10 fois à l'eau échangée et 10 fois à l'eau distillée, Série B	Produit introduit	Produits retrouvés Après avoir été lavés: 20 fois à l'eau ordinaire, Série A	Produits retrouvés Après avoir été lavés: 10 fois à l'eau échangée et 10 fois à l'eau distillée, Série B
Poids des produits séchés à l'air :									
Introduits	9,844			9,908			9,678		
Retrouvés		11,636	5,962		11,792	6,266		12,668	6,724
Poids des produits séchés à 105° :									
Introduits	8,416			9,085			7,890		
Retrouvés		10,164	4,549		10,671	5,225		10,502	4,937
Pertes à 105° en % sur les produits introduits ou retrouvés séchés à l'air	14,52	12,65	23,68	8,28	9,48	16,60	18,48	17,08	26,57
Analyses chimiques en %. Sur produits séchés à 105°.									
SiO_2	65,90	29,49	64,21	65,60	34,47	63,77	56,06	28,54	49,42
Fe_2O_3	10,15	8,42	18,49	12,74	10,87	20,37	22,66	17,04	34,47
CaO	9,67	30,62	3,48	4,88	26,16	1,58	4,58	27,63	1,93
MgO	1,92	1,86	1,98	1,98	1,26	1,56	0,73	0,39	0,23
K_2O	2,01	0,07	0,08	2,37	0,14	0,26	0,85	0,05	0,04
Pertes de 105° à 1 000° ($H_2O + CO_2$)	10,35	29,54	11,76	12,43	27,10	12,46	15,12	26,35	13,91
Rapports moléculaires pour Fe_2O_3 = 1,00.									
SiO_2	17,30	9,34	9,26	13,74	8,46	8,35	6,60	4,46	3,82
Fe_2O_3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CaO	2,71	10,37	0,53	1,09	6,86	0,22	0,57	4,62	0,16
MgO	0,75	0,88	0,42	0,62	0,46	0,30	0,13	0,09	0,03
K_2O	0,336	0,014	0,007	0,316	0,023	0,021	0,064	0,005	0,002
Pertes de 105° à 1000° (H_2O seulement)	9,05		5,65	8,67		5,43	5,93		3,58

CaO : augmentations très importantes qui ne correspondent qu'à des dépôts.

Série B. — (10 lavages à l'eau échangée et 10 lavages à l'eau distillée).

Pour les 3 complexes étudiés, on voit, par rapport aux produits initiaux, que la teneur en SiO_2 est à peu près la même pour les complexes n[os] 1 et 2 et un peu plus faible pour le n° 3.

Dans tous les cas, on observe une très forte augmentation de l'oxyde de fer (80 p. 100 pour le complexe n° 1). Les teneurs en CaO diminuent de plus des 2/3 pour tous les produits. Pour MgO, les variations sont nulles pour le complexe n° 1, et faibles pour les complexes n[os] 2 et 3.

Par contre K_2O semble disparaître complètement par lavages. Les pertes de 105° à 1 000° qui correspondent à l'eau de constitution diffèrent peu entre les produits avant et après lavages.

On observe un abaissement général des rapports moléculaires de tous les éléments étudiés par rapport à $Fe_2O_3 = 1{,}00$.

Cet abaissement atteint 40 p. 100 pour SiO_2 et également pour l'eau de constitution.

Les rapports s'abaissent de 4 à 5 fois pour CaO, de 1 à 5 fois pour MgO et de 15 à 50 fois pour K_2O.

On voit que les lavages à l'eau échangée et à l'eau distillée dissolvent de petites quantités de Fer, mais entraînent des quantités plus importantes de tous les autres éléments. Finalement, on obtient des produits qui se sont enrichis en Fer (et en oxyde ferrique correspondant).

Les complexes séchés et broyés se conduisent donc comme les complexes étudiés sous forme de floculats, c'est-à-dire que les lavages ont eu pour résultat dans les deux cas d'éliminer de grosses quantités de SiO_2 et d'abaisser les rapports SiO_2 oxydes métalliques en présence.

IV. — PASSAGE EN SOLUTION DU FER FERRIQUE INTRODUIT SOUS DIFFÉRENTES FORMES

Cette série d'expériences a pour but de préciser dans quelles conditions il est possible d'augmenter la teneur des solutions du sol en Fer, afin de faciliter la nutrition ferrique des végétaux.

Technique Expérimentale

4 séries de 5 bocaux de 2 litres.

Préparations faites avec de l'eau ordinaire.

Volume final du liquide dans chaque expérience : 2 litres .

Les séries sont faites de la façon suivante :

Série A. — Ne reçoit que de l'eau ordinaire.

Série B. — Est additionnée d'une solution de sulfate ferrique ammoniacal correspondant à 300 mg de fer métal.

Série C. — Reçoit un volume de pseudo-solution de complexe ferri-silicique correspondant à 300 mg de fer métal. On ajoute 4 g de chlorure de calcium en solution neutre. On agite soigneusement pour obtenir une floculation complète en 24 heures.

Série D. — Reçoit 2 g de poudre du complexe ferri-silicique (étudié sous le n° 2 au Chapitre III) et contenant 160 mg 7 de fer métal.

Les 5 bocaux de chaque série reçoivent :

Essai n° 1 : 0 g de terre
Essai n° 2 : 20 g de terre
Essai n° 3 : 40 g de terre
Essai n° 4 : 80 g de terre
Essai n° 5 : 160 g de terre.

a) Étude des essais n° 1 (en l'absence de terre).

Le bocal n° 1 de chaque série a pour but de voir l'action de l'eau ordinaire sur chacun des produits en l'absence de terre.

Après 8 jours de repos, on décante les 4/5 du liquide supérieur ; soit 1 l 600 que l'on remplace par un même volume d'eau ordinaire.

On fait tout d'abord 10 lavages successifs à l'eau ordinaire, puis pour terminer l'expérience et afin de pouvoir faire un bilan analytique de celle-ci on remplace ce liquide par l'eau distillée dans les conditions suivantes.

Pour les séries A et B, on fait seulement un 11e et un 12e lavage à l'aide de cette eau distillée.

Pour les essais C et D ; on pousse jusqu'au 15e lavage avec de l'eau distillée.

Les résidus et précipités restant au fond des bocaux sont ensuite recueillis et séchés.

On dose SiO_2 et Fe dans toutes les solutions décantées et dans les produits restant après lavages.

Les résultats analytiques sont présentés au tableau V.

Dans ces 4 séries d'essais l'apport de Fer sous les diverses formes a eu pour résultat dans tous les cas d'augmenter la quantité de cet élément passant et restant en solution.

La quantité de Fer ainsi présent en solution est d'autant plus élevée que le milieu est plus pauvre en sels de calcium solubles et que la SiO_2 existe en proportions suffisantes pour réaliser avec le Fer des complexes pseudo-solubles.

Par rapport aux résultats obtenus pour la série A (série témoin), on peut constater que la quantité de Fe retrouvée en solution augmente de bien peu de chose pour la série B qui a reçu une solution de sulfate ferrique

Tableau V

Résultats analytiques obtenus pour les essais n° 1

En l'absence de terre — dans chacune des 4 séries.

	SiO_2 en mg				Fe en mg				Rapports moléculaires $SiO_2/2$ Fe (ou Fe_2O_3)			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Éléments introduits. Au total — par l'eau ordinaire et les produits ajoutés.												
	162,8	235,1	2135,1	1344,8	2,020	302,020	302,020	162,740	150,4	1,45	13,2	15,4
Éléments retrouvés — en solution par litre,												
Moyennes, par litre, sur les 10 premiers lavages à l'eau ordinaire de la ville .	9,79	10,39	63,56	25,45	0,104	0,167	0,365	0,246	175,6	116,1	325,0	193,0
11e lavage à l'eau distillée	2,0	4,1	52,5	27,3	0,070	0,230	0,460	0,290	53,7	33,3	212,9	175,0
12e — — —	1,3	5,2	41,6	21,7	0,070	0,290	2,660	0,360	34,9	33,4	29,2	112,6
13e — — —	—	—	38,8	14,0	—	—	3,670	0,270	—	—	19,7	96,8
14e — — —	—	—	21,0	10,7	—	—	2,120	0,230	—	—	18,4	87,0
15e — — —	—	—	18,8	7,5	—	—	2,590	0,500	—	—	13,5	28
Éléments retrouvés — au total — dans les résidus et précipités après le 12e ou le 15e lavage.												
	0,4	51,9	825,4	796,1	0,350	290,850	279,090	158,200	2,1	0,33	5,5	9,4

ammoniacal. Elle augmente beaucoup plus pour la série C où l'on amène le fer sous forme de pseudo-solution de complexe ferri-silicique. En série D, où ce même complexe ferri-silicique est amené sous forme de poudre, on obtient pour les solutions des teneurs en fer qui se classent de façon intermédiaire entre celles observées pour les séries B et C.

b) **Étude des essais en présence de terre.**

Dans les essais n^{os} 2, 3, 4, 5 des séries A, B, C, D et, pour un volume total de solution qui reste fixé à 2 000 cc, nous avons ajouté de la terre de l'horizon B de l'Étoile de Choisy (Versailles) en quantités croissantes :

20 g pour les essais n° 2
40 g pour les essais n° 3
80 g pour les essais n° 4
160 g pour les essais n° 5.

Nous effectuons également 10 lavages successifs à l'eau ordinaire que nous décantons les uns après les autres et nous terminons par un 11^{e} lavage à l'eau distillée.

En présence de terre, un 12^{e} lavage à l'eau distillée ne permet pas d'obtenir la décantation d'un liquide clair même après un temps de dépôt prolongé.

Le tableau VI indique les teneurs en SiO_2 et Fe en mg par litre dosés dans les solutions.

Les résultats sont différents mais de même sens que ceux obtenus en l'absence de terre.

Pour la moyenne des 10 premiers lavages à l'eau ordinaire et en fonction de l'augmentation de la quantité de terre introduite, on constate (par rapport aux essais sans apport de terre) que :

Les teneurs en SiO_2 tendent à diminuer pour les séries A et B ; elles diminuent davantage en séries C et D.

Les teneurs en Fer également tendent à s'abaisser un peu en série A ; mais beaucoup plus en série B. Ici l'apport de Fer sous forme de sel ferrique semble être sans résultat.

Pour la série C, la teneur en Fer augmente pour les essais n° 2 < n° 3 (avec 20 et 40 g de terre) puis baisse de l'essai n° 4 > n° 5 (80 et 160 g de terre) qui lui est égal à l'essai n°1 (sans terre).

C'est dans cette série C que les quantités de fer en mg par litre restant présentes en solution sont les plus fortes.

En série D, les quantités de fer sont égales pour les essais n° 1 (sans terre) et n° 2 (20 g de terre) puis elles baissent beaucoup ensuite avec l'augmentation des poids de terre des essais n° 3 > n° 4 > n° 5 (40, 80 et 160 mg de terre).

Dans ces différentes solutions, les rapports moléculaires $SiO_2/2\ FeO$ (ou Fe_2O_3) varient en plus ou en moins, mais sont toujours élevés.

TABLEAU VI

Résultats analytiques obtenus — dans chacune des 4 séries — pour les solutions de lavages en fonction de l'apport de terre en qualités croissantes.

	SiO_2 en mg par litre				Fe en mg par litre				Rapports moléculaires $SiO_2/2Fe$ (ou Fe_2O_3)	
	Sur les 10 premiers lavages à l'eau ordinaire			Sur le 11e lavage à l'eau distillée	Sur les 10 premiers lavages à l'eau ordinaire			Sur le 11e lavage à l'eau distillée	Sur la moyenne des 10 premiers lavages	Sur le 11e lavage
	Maxima	Minima	Moyennes		Maxima	Minima	Moyennes			
Série A :										
Essais n° 1 (sans terre)	13,9	8,2	9,79	2,0	0,180	0,040	0,104	0,070	175,6	53,7
— 2. Terre 20 g	11,0	8,5	9,68	5,0	0,150	0,070	0,103	0,130	175,3	71,8
— 3. — 40 –	11,5	8,9	9,72	8,2	0,150	0,040	0,102	0,150	177,8	101,9
— 4. — 80 –	11,5	7,3	9,64	7,9	0,140	0,040	0,101	0,130	178,1	113,5
— 5. — 160 –	10,5	7,2	8,82	7,0	0,150	0,040	0,100	0,100	164,6	131,0
Série B :										
Essais n° 1 (sans terre)	20,5	7,8	10,39	4,1	0,290	0,050	0,167	0,230	116,1	33,3
— 2. Terre 20 g	26,2	6,9	10,51	3,7	0,290	0,040	0,108	0,120	181,7	57,6
— 3. — 40 –	28,6	6,6	11,19	4,0	0,200	0,040	0,100	0,110	208,8	72,4
— 4. — 80 –	26,3	7,6	11,16	5,3	0,130	0,040	0,089	0,100	233,9	99,2
— 5. — 160 –	15,6	7,3	9,54	5,0	0,120	0,040	0,083	0,080	214,5	124,3
Série C :										
Essais n° 1 (sans terre)	119,6	44,6	63,56	52,5	0,530	0,190	0,365	0,460	325,0	212,9
— 2. Terre 20 g	118,4	39,8	64,09	48,7	0,770	0,290	0,567	0,640	211,0	142,1
— 3. — 40 –	118,5	39,5	63,23	51,0	0,850	0,270	0,593	0,650	199,4	146,5
— 4. — 80 –	114,3	38,3	61,11	63,3	0,830	0,250	0,576	0,700	198,0	169,0
— 5. — 160 –	103,0	36,0	56,41	61,2	0,580	0,170	0,367	0,530	286,9	215,6
Série D :										
Essais n° 1 (sans terre)	31,4	21,2	25,45	27,3	0,350	0,150	0,246	0,290	193,0	175,6
— 2. Terre 20 g	37,2	21,8	26,61	35,0	0,440	0,120	0,254	0,360	195,5	180,6
— 3. — 40 –	29,5	19,4	23,11	28,2	0,270	0,090	0,166	0,290	262,1	181,4
— 4. — 80 –	27,5	20,0	22,77	23,5	0,180	0,070	0,124	0,230	342,8	191,0
— 5. — 160 –	24,6	19,0	20,31	18,5	0,180	0,060	0,118	0,170	321,1	202,8

Pour le 11[e] lavage à l'eau distillée, les teneurs en SiO/ se classent dans le même sens que celui constaté pour les 10 premiers lavages, mais elles sont toujours plus faibles pour les séries A et B. Elles sont généralement égales et même parfois un peu supérieures pour les séries C et D.

Les teneurs en Fer sont de même ordre pour les séries A et B et ont tendance à être toujours un peu plus fortes en série D et surtout en série C que les moyennes des 10 premiers lavages.

Les rapports moléculaires $SiO_2/2$ FeO (ou Fe_2O_3) de ces 11[es] lavages sont toujours un peu plus faibles que ceux des moyennes des 10 lavages précédents mais néanmoins restent élevés.

V. — ACTION PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES PSEUDO-SOLUTIONS DE COMPLEXES MÉTALLO-SILICIQUES SUR DES CULTURES EXPÉRIMENTALES DANS DIFFÉRENTES CONDITIONS DU MILIEU

L'expérience a porté sur du maïs, de l'orge et du soja, cultivés sur milieux liquides, sable et terre.

Les graines ont été mises à germer pendant 15 jours dans du sable grossier de Fontainebleau, puis placées dans les différents milieux.

Pour les liquides, nous avons utilisé le milieu minéral complet de nos expériences antérieures (1). Chaque jour, les pots étaient aérés par barbottage d'air comprimé et complétés à 2 litres par de l'eau distillée.

Pour les cultures sur sable, nous avons ajouté les éléments du milieu minéral. Chaque jour les pots étaient aérés, par de l'air comprimé et humidifiés de façon suffisante avec de l'eau distillée.

Pour les pots de terre, nous avons ajouté, sous forme d'engrais, les éléments du milieu minéral. Chaque jour, on arrosait à l'eau distillée pour maintenir une humidité suffisante.

Tous ces milieux ont été additionnés de pseudo-solutions des différents complexes métallo-siliciques dans des conditions indiquées au tableau VII.

Les cultures ont été poursuivies pendant 2 mois, les parties aériennes ont été coupées, séchées à 105° à poids constant et pesées.

Les résultats sont donnés au tableau VII en indices de comparaison (témoin = 100).

Leur examen nous permet de constater que :

1° Le classement obtenu pour un végétal donné n'est pas le même pour le milieu liquide, le sable et la terre.

2° Le classement pour un milieu donné, n'est pas le même pour le maïs, l'orge et le soja.

3° L'addition à l'élément Fer d'un seul métal secondaire donne pour le maïs des résultats qui sont généralement supérieurs en milieu liquide et en milieu sable ; il n'en est pas de même pour la terre.

Tableau VII

Récoltes obtenues pour l'ensemble des parties aériennes des végétaux mis en expérience

Nos des Essais	Poids en milligrammes des Métaux introduits sous forme de complexes Métallo-Siliciques	Milieux liquides			Sable			Terre		
		Maïs	Orge	Soja	Maïs	Orge	Soja	Maïs	Orge	Soja
1	20 Fe Témoin (Récoltes en grammes de matière sèche. Indice de comparaison = 100).	17,80	12,95	7,10	10,40	17,80	8,07	20,10	8,70	9,32
2	20 Fe + 20 Al	137	205	187	206	127	125	145	92	106
3	20 Fe + 20 U	187	189	79	178	147	128	85	114	75
4	20 Fe + 20 Mn	194	83	69	159	92	103	63	76	84
5	20 Fe + 10 La	202	103	172	158	97	112	137	111	71
6	20 Fe + 10 Hg	113	40	80	119	137	82	60	70	89
7	20 Fe + 10 Cu	125	61	117	164	111	125	128	89	82
8	20 Fe + 5 Zn	105	122	88	151	72	87	128	88	65
9	20 Fe + 10 Pb	282	198	200	186	79	114	96	90	64
10	20 Fe + 7 U + 7 Mn + 3 La	159	122	120	204	105	103	71	63	67
11	20 Fe + 3 Hg + 3 Cu + 2 Zn + 3 Pb	69	132	111	111	147	151	71	62	78
12	20 Fe + 3 U + 3 Mn + 1 La + 1 Hg + 1 Cu + 1 Zn + 1 Pb	59	244	112	181	122	218	91	62	67

Les choses se passent moins bien pour l'orge et surtout pour le soja.

4° L'addition simultanée de 2 ou plusieurs métaux secondaires donne en certains cas des effets nettement négatifs.

Cette expérience ne doit être considérée que comme un exemple des difficultés que l'on rencontre lorsque l'on cherche à mettre en comparaison des végétaux ayant chacun un comportement différent dans les milieux de culture utilisés.

VI. — **CONCLUSIONS**

Le présent mémoire s'inscrit dans la ligne de nos publications antérieures (1, 2, 3, 4, 5, 6) qui avaient montré que :

a) Les complexes métallo-siliciques du Fer et de l'Aluminium, éléments que l'on trouve en quantités importantes dans tous les sols, doivent prendre naissance au sein des micelles des colloïdes argileux présents dans le milieu naturel sous forme de très petits volumes d'une pseudo-solution présentant une concentration qui doit être de l'ordre de quelques mg par litre de l'élément métallique en cause.

b) Une fois formés ces produits complexes traversent la zone membrane de ces colloïdes pour diffuser vers le milieu extérieur où ils se diluent progressivement au contact des solutions du sol. Ils voient ainsi leur concentration initiale s'abaisser progressivement pour devenir souvent très faible.

c) Si le liquide de dilution est constitué par de l'eau pure, on obtient des solutions de plus en plus étendues qui restent stables indéfiniment.

Ces nouvelles expériences nous permettent de préciser que :

1° La dilution des pseudo-solutions de complexes métallo-siliciques augmente leur sensibilité aux électrolytes alcalins et surtout alcalino-terreux présents dans le milieu, dans les conditions naturelles, et il arrive toujours un moment où la limite de résistance est dépassée.

Il se produit alors un phénomène de floculation du complexe métallo-silicique accompagné d'une cassure ou rupture de l'équilibre interne SiO_2/Métal avec comme résultat le dépôt d'un floculat ayant un rapport $SiO_2/2$ M (ou 2 MO ou M_2O_3) plus faible que celui de la pseudo-solution initiale.

Sur ce floculat se trouve un liquide où les éléments restant en pseudo-solution ont un rapport moléculaire $SiO_2/2$ M (ou MO ou M_2O_3) très élevé et où la teneur en métal par litre peut devenir non pas nulle mais très faible. Par exemple, pour Fe inférieure à 50 γ par litre (tableau III).

Dans ce cas, le rapport moléculaire $SiO_2/2$ Fe (ou FeO ou Fe_2O_3) des éléments restant présents en solution peut être de l'ordre de grandeur de 200 à 400 dans les cas les plus courants et même atteindre bien souvent des valeurs plus élevées (tableau III).

2° Les floculats des complexes métallo-siliciques, lorsqu'ils sont soumis à des opérations de lavages successifs, voient leurs rapports $SiO_2/2$ M

(ou M_2O_3) s'abaisser d'autant plus que le nombre des lavages est plus grand (tableau II).

Pour les solutions en équilibre avec ces mêmes floculats, elles ont toujours des rapports SiO_2/M_2O_3 plus élevés que celui du produit déposé et des titres en élément métallique présent en solution qui sont d'autant plus faibles que la solution de lavage est plus riche en sels alcalins ou alcalino-terreux (tableau III).

3° Des complexes métallo-siliciques du Fer (ferreux ou ferrique) sous forme de poudres, soumis eux aussi à des lavages prolongés avec de l'eau ordinaire, échangée ou distillée donnent également naissance à des produits où les rapports $SiO_2/2$ M (ou 2 MO ou M_2O_3) diminuent en fonction du nombre des lavages (tableau IV) et des solutions qui sont d'autant plus riches en SiO_2 et en métal Fer que le liquide de lavage utilisé est plus pur.

Dans ces solutions également, on observe des rapports SiO_2/Métal bien plus élevés que ceux existant dans les produits complexes initiaux, pris cette fois sous forme de poudres (tableau III).

4° Dans d'autres expériences décrites (tableaux V, VI) nous avons essayé d'augmenter la quantité de Fer susceptible de rester présent dans des solutions se trouvant en équilibre avec le sol.

Grâce à l'action de la Silice agissant en tant que corps protecteur, nous sommes arrivés en certains cas à obtenir des solutions contenant du Fer en quantités nettement plus élevées que ce que l'on observe dans la pratique, les teneurs ainsi réalisées étant susceptibles de varier dans des limites assez larges en fonction des nombreuses modifications que l'on peut apporter aux conditions du milieu.

5° Dans les conditions naturelles, le titre maximum que l'on peut obtenir n'est jamais très élevé quel que soit le mode opératoire adopté car on se trouve en présence de liquides contenant des sels de calcium solubles (cas des eaux de drainage). L'examen de ces sortes de solutions montre que l'augmentation du temps de dépôt abaisse généralement le titre du Fer qu'elles contiennent non pas sous forme soluble, mais pseudo-soluble, voire même suspensoïde. Les chiffres indiqués doivent être considérés comme étant des ordres de grandeur et non des titres bien définis.

6° Cette étude a été faite en utilisant comme corps protecteur la Silice ou l'anion silicique. Mais nous savons, d'après nos recherches antérieures (1,2,3,4,5,6) et par les travaux de nombreux autres chercheurs, en particulier de R. BETREMIEUX (7) que de nombreux corps protecteurs peuvent remplacer la Silice.

Il s'agit des matières organiques qui peuvent donner une gamme variée de produits les plus divers, notamment des acides humiques à charge électrique plus ou moins négative et des molécules neutres de constitutions chimiques très diverses qui apparaissent comme étant dénuées de toute charge électrique.

7° D'autres expériences dont nous ferons état dans un mémoire ultérieur nous permettent de penser que les choses se passent sensiblement de la même façon pour tous les autres métaux susceptibles de se trouver présents dans les sols et qui peuvent donner naissance à des complexes métallo-siliciques.

Ceci est valable tout particulièrement pour l'Aluminium dont il a déjà été question dans nos recherches.

8° Une expérience de physiologie végétale nous permet de juger des difficultés que l'on rencontre lorsque l'on cherche à mettre en comparaison des végétaux ayant chacun un comportement différent dans des milieux de cultures qui ne sont pas de même nature.

Notes analytiques. Dosages colorimétriques de SiO_2 et de Fe

Dosages de SiO_2

Dans le travail précédent, les dosages gravimétriques ont été exécutés par la méthode classique sur des prises d'essais d'autant plus importantes que les teneurs en SiO_2 étaient plus faibles ; les déterminations colorimétriques ont été faites selon la méthode du complexe silico-molybdique [1].

Nous avons utilisé un colorimètre Meunier (construit par Jobin et Yvon) et opéré en lumière blanche avec un écran 43 et une cuve de 4 cm de large.

Des essais préalables ont montré que l'emploi de cette méthode donne une coloration qui va en augmentant pendant 10 minutes, puis reste stable les 10 minutes suivantes. Par la suite, cette coloration décroît de façon lente et continue.

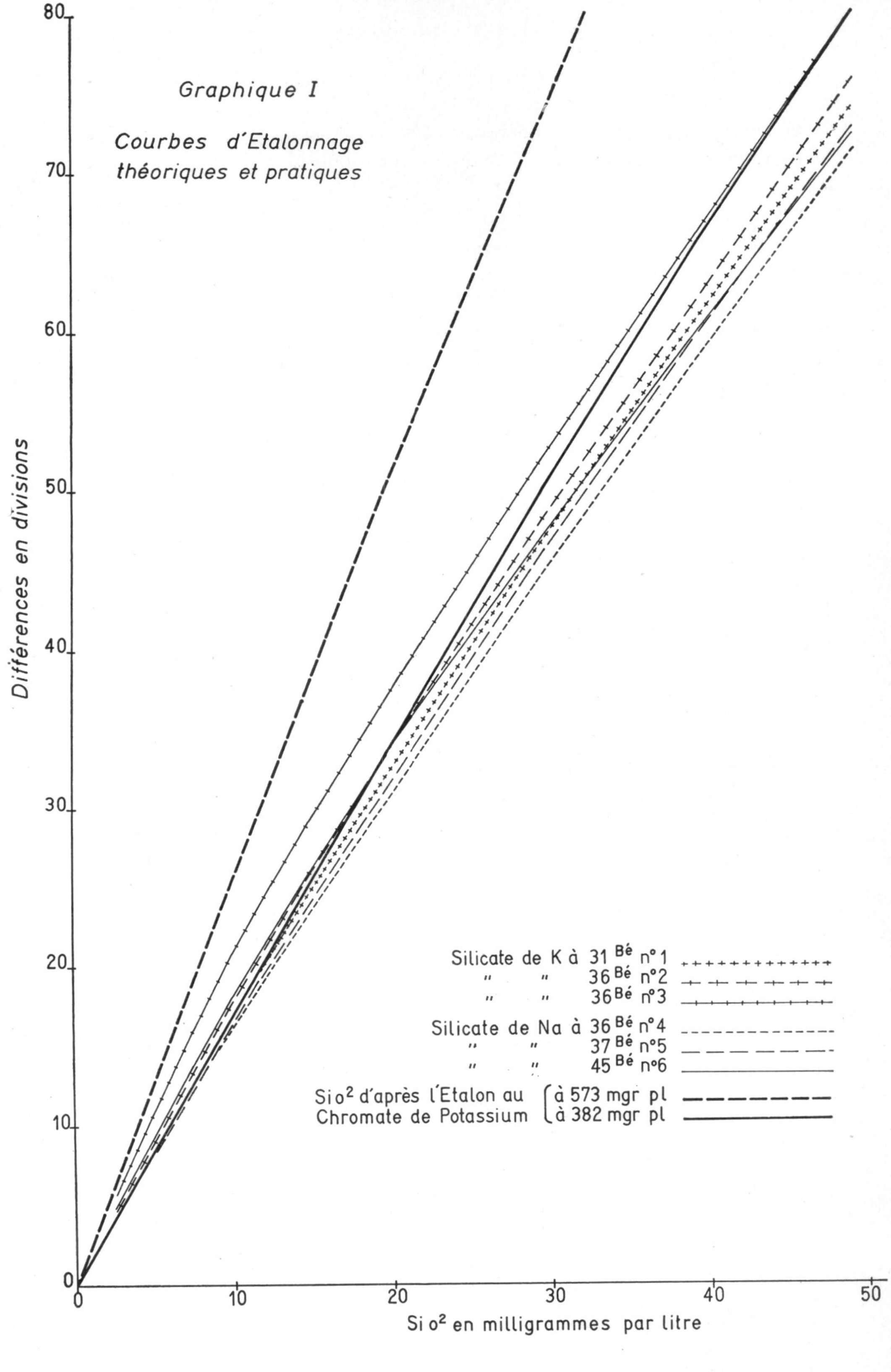
Nous nous sommes donc astreints à procéder aux mesures 15 minutes après la préparation.

1° Étude sur des solutions de silicates alcalins.

Nous avons tracé une courbe d'étalonnage en utilisant des solutions de différents silicates alcalins ayant les caractéristiques ci-après :

	Éléments contenus en gr pour 1 000 cc		Rapports moléculaires
	SiO_2	K_2O	SiO_2/K_2O
n° 1 Silicate de potassium technique à 31 Bé — Prolabo 1956	142.0	146,0	1,526
n° 2 Silicate de potassium pur à 36 Bé Prolabo 1956	190,0	146,5	2,036
n° 3 Silicate d° potassium technique à 36 Bé — Bozel Malétra 1949	245,4	141,2	2,728
	SiO_2	NaO_2	SiO_2/NaO_2
n° 4 Silicate de sodium pur à 36 Bé Prolabo 1956	186,0	126,0	1,526
n° 5 Silicate de sodium technique à 37 Bé — Prolabo 1956	250,0	108,7	2,376
n° 6 Silicate de sodium technique à 45 Bé — Prolabo 1956	303,3	206,0	1,522

(1) G. Charlot et R. Gaugin, Dosages colorimétriques. Principes et Méthodes, 1952, Masson et C°, Éditeurs, Paris.



Graphique I
Courbes d'Etalonnage
théoriques et pratiques
Différences en divisions
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Si o² en milligrammes par litre
Silicate de K à 31 Bé n° 1
" " 36 Bé n°2
" " 36 Bé n°3
Silicate de Na à 36 Bé n°4
" " 37 Bé n°5
" " 45 Bé n°6
Si o² d'après l'Etalon au Chromate de Potassium
à 573 mgr pl
à 382 mgr pl

Les déterminations ont été faites sur chacun de ces produits pour des concentrations variant de 2 mg 5 à 50 mg 0 de SiO_2 par litre. Les résultats sont indiqués sur le graphique I et en valeurs chiffrées sur le tableau I.

Nous avons porté en comparaison les résultats obtenus par la courbe d'étalonnage théorique que l'on obtient en employant le chromate de potassium à la concentration indiquée dans la littérature (573 mg par litre) et à une concentration 1/3 plus faible (soit 382 mg par litre).

TABLEAU I

Courbes d'étalonnage théoriques et pratiques. Valeurs chiffrées, obtenues expérimentalement.

SiO_2 en mg par litre (déterminé gravimétriquement)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	20,0	30,0	40,0	50,0
Silicate de K à 31B n° 1......	4,4	8,5	12,4	16,2	19,8	23,4	30,6	44,8	58,4	71,4
» » 36B n° 2.......	4,5	8,4	12,3	16,3	20,2	24,0	31,5	46,1	59,8	72,8
» » 36B n° 3......	4,8	9,3	13,8	18,0	22,1	26,0	33,6	47,1	60,0	72,5
» Moyennes n°s 1-2-3 ...	4,6	8,7	12,8	16,8	20,7	24,3	31,9	45,9	59,4	72,2
Silicate de Na à 36B n° 4	4,3	8,5	12,7	16,8	20,8	24,7	32,4	46,9	60,9	74,2
» » 37B n° 5	4,6	9,1	13,4	17,7	21,8	25,9	33,6	48,1	61,9	75,8
» » 45B n° 6	5,7	11,0	16,0	20,7	25,1	29,3	37,1	51,9	66,2	79,9
» Moyennes n°s 4-5-6....	4,8	9,4	14,0	18,3	22,4	26,5	34,3	48,9	62,9	76,4
Silicates K + Na. Moyennes n°s 1 à 6	4,7	9,1	13,4	17,5	21,5	25,4	33,0	47,4	61,1	74,3
Solution étalon au Chromate de K										
Nouv. titre proposé 382 mg p.l.	4,2	8,3	12,5	16,7	20,8	25,0	33,3	50,0	65,6	80,3
Anc. titre utilisé 573 mg p.l...	6,3	12,5	18,8	25,0	31,3	37,5	50,0	73,0	94,3	111,9

L'examen des résultats nous montre que :

1° Les tracés obtenues pour tous les silicates de K ou Na sont des courbes qui s'infléchissent progressivement en cours de leur développement de 2 mg 5 à 50 mg 0 de SiO_2 par litre.

2° Ces courbes se séparent les unes les autres dès leur départ et plus encore à leur maximum.

3° Les valeurs obtenues avec des silicates de K, sont un peu plus faibles que celles observées pour les silicates de Na.

4° Les courbes se différencient plus par la concentration des solutions en mg de SiO_2 par litre que par les rapports moléculaires SiO_2/K_2O ou SiO_2/Na_2O.

5° Il n'y a pas de proportionnalité entre l'augmentation de la teneur en SiO_2 et l'élévation des mesures en divisions lues au colorimètre.

Pour 5 mg de SiO_2 par litre, on a :	lecture maximum	11,0
	lecture minimum	8,4
	Différence.	2,6
Pour 50 mg de SiO_2 par litre, on a :	lecture maximum.	79,9
	lecture minimum	71,4
	Différence.	8,5

6° La courbe d'étalonnage théorique au chromate de potassium à 573 mg par litre qui est une ligne presque droite, s'écarte beaucoup des courbes obtenues avec les silicates.

7° Une même courbe théorique au chromate de potassium pour une con-

centration de 382 mg par litre donne également une ligne presque droite, mais qui se place assez bien dans la moyenne des courbes pratiquement obtenues pour tous les silicates de K et Na.

Au début avec 2 mg 5 de SiO_2 par litre, cette courbe se confond avec les minima, avec 50 mg de SiO_2 par litre, elle correspond au maximum constaté.

L'examen attentif de tous les résultats obtenus montre que les dosages colorimétriques de la SiO_2 par la méthode silicomolybdique apparaissent comme étant sujets à des erreurs importantes, même en opérant sur des solutions de silicates alcalins qui devraient nous placer dans les meilleures conditions opératoires.

2° Étude sur des solutions obtenues aux dépens des différents produits complexes utilisés dans la présente mémoire.

Le graphique II présente les résultats observés sur des solutions obtenues en mettant de l'eau distillée, échangée, ou ordinaire en contact avec les différents produits complexes étudiés.

Les concentrations par litre (dosées gravimétriquement) varient de 1 mg 3 à 50 mg 0 de SiO_2 par litre.

Les résultats sont très déconcertants.

On obtient une nébuleuse de points qui se classent de tous côtés des lignes d'étalonnage théoriques au chromate de potassium à 573 mg et à 382 mg par litre.

Les différences sont trop grandes pour que l'on puisse faire confiance au dosage colorimétrique de SiO_2 par la méthode du complexe silicomolybdique.

En effet, pour une lecture donnée, en divisions lues au colorimètre, les poids de SiO_2, en mg par litre, varient entre de grandes limites.

Lectures en divisions	SiO_2 en mg par litre
20	de 5 à 10
30	de 7 à 20
40	de 15 à 30
50	de 20 à 35
60	de 25 à 40
70	de 30 à 47
80	de 40 à 50

3° Étude sur des solutions de natures diverses pour des faibles teneurs.

Dans le graphique III, nous présentons des résultats obtenus pour des teneurs variant de 5 à 15 mg de SiO_2 par litre, dans des solutions de natures très différentes.

Nous y voyons figurer :

1° Les courbes théoriques d'étalonnage au chromate de potassium à 573 et à 382 mg par litre.

2° Les résultats obtenus par les dosages de la SiO_2.

a) contenue dans l'eau échangée ;

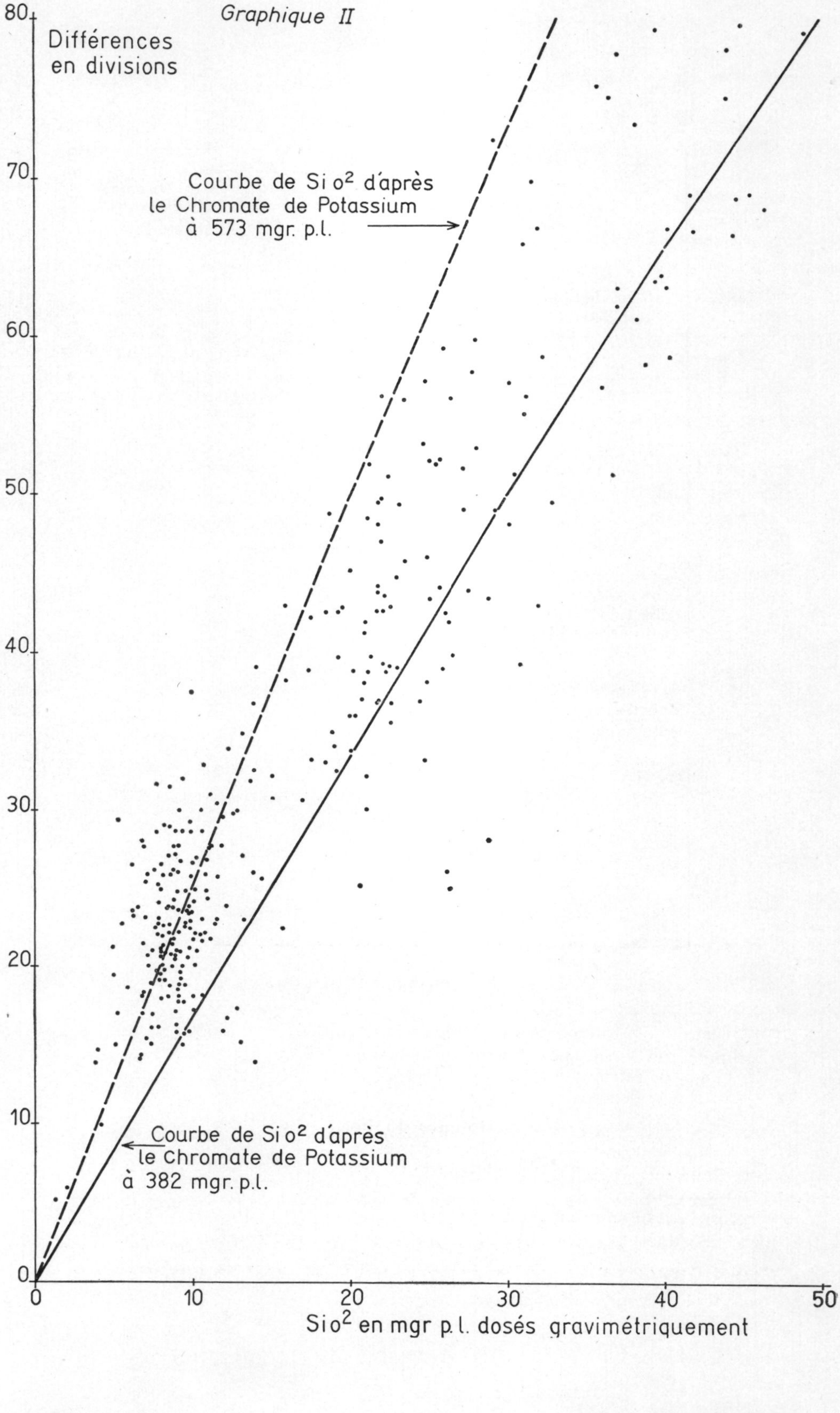
b) contenue dans l'eau ordinaire ;

c) passée en solution dans l'eau distillée aux dépens des complexes.

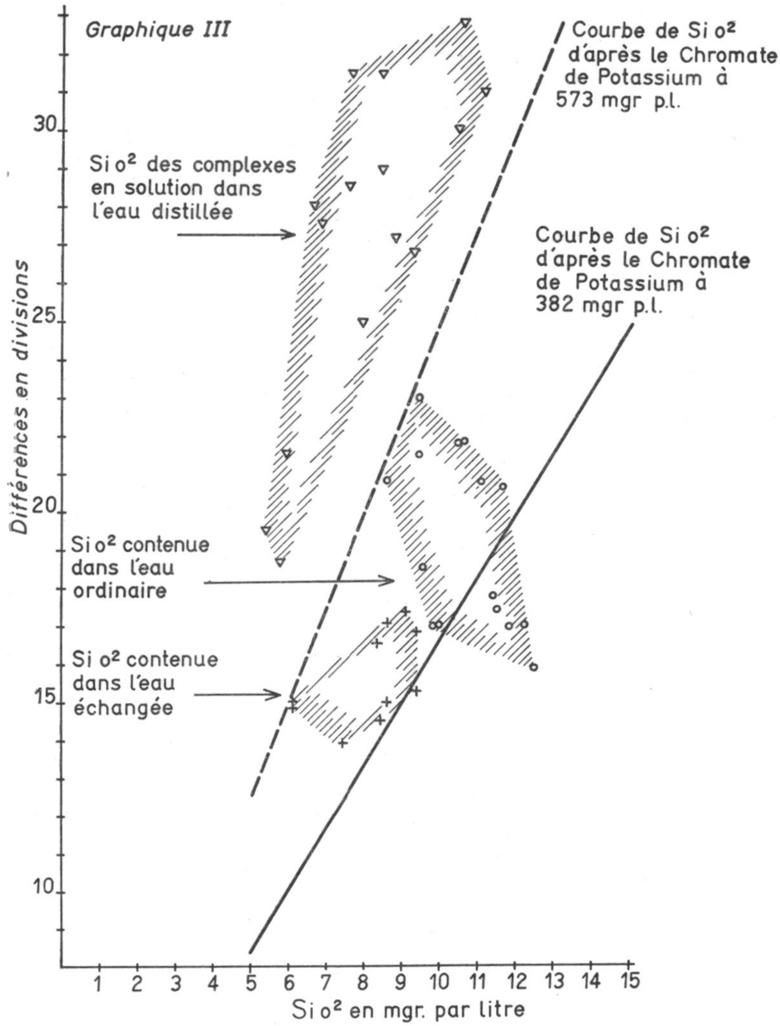
Nous obtenons trois zones de points, bien séparées les unes des autres.

— Celle de l'eau échangée et celle de l'eau ordinaire qui s'intercalent assez bien dans l'ensemble des courbes théoriques et pratiques d'étalonnage.

Graphique II



— Celle de la SiO_2 passée en solution dans l'eau distillée qui s'écarte notablement des 2 précédentes.



Il est donc totalement impossible de faire confiance à la méthode du dosage colorimétrique de SiO_2 par le complexe silicomolybdique telle qu'elle est utilisée actuellement.

Dosages du Fer.

Les déterminations colorimétriques ont été faites par la méthode à l'orthophénanthroline (1).

Nous avons utilisé un colorimètre meunier (construit par Jobin et Yvon) et opéré en lumière blanche avec un écran 49 et une cuve de 4 cm de large.

(1) G. Charlot et R. Gaugin, Dosages colorimétriques. Principes et Méthodes, 1952, Masson et Cº Éditeurs, Paris.

Les courbes ont été tracées pour des solutions contenant de très faibles quantités d'élément variant de 20 à 500 γ de fer par litre et en utilisant comme liquide dissolvant :

— de l'eau distillée ;

— de l'eau échangée ;

— de l'eau ordinaire.

Les très nombreuses déterminations effectuées permettent de conclure que l'on peut toujours obtenir des mesures correctes en respectant les règles suivantes :

1° Commencer les mesures après 24 heures de contact.

2° Mesurer de nouveau de 24 en 24 heures.

3° Retenir les chiffres à partir du moment où 2 mesures effectuées à 24 heures d'intervalle sont identiques.

Ce résultat se produit au bout d'un temps qui est d'autant plus long que la solution est plus diluée en Fer et plus riche en éléments étrangers susceptibles de retarder le dosage (tels que Ca et les matières organiques) à des doses de l'ordre de celles que l'on rencontre dans les eaux de drainage et dans l'eau ordinaire.

RÉSUMÉ

Les complexes métallo siliciques du fer et des autres métaux qu'on trouve dans les sols, semblent prendre naissance au sein des micelles des colloïdes argileux sous forme de très petits volumes de solutions relativement concentrées.

Une fois formés ces produits diffusent dans le milieu extérieur où ils se diluent progressivement en présence des solutions du sol.

Au contact des éléments minéraux contenus dans ces solutions, il se produit une suite de floculations, et éventuellement des redispersions, successives qui ont pour résultat de donner, d'une part, des solutions de complexes à rapports SiO_2/métal plus élevés que celui existant dans la solution initiale et, d'autre part, des floculats où ces mêmes rapports SiO_2/métal s'abaissent pour finalement devenir très faibles.

A l'aide des complexes métallo-siliciques préparés en laboratoire et tout particulièrement des complexes du fer ferreux ou ferrique, on peut essayer d'augmenter la teneur de cet élément fer présent dans les solutions du sol. Mais l'expérience montre que les concentrations maxima que l'on peut obtenir dans des conditions qui tendent à se rapprocher de celles existant dans le milieu naturel ne sont jamais très élevées quel que soit le produit et le mode opératoire adoptés.

SUMMARY

The role of mineral or organic anions in geochemical and physiological processes.

The silicic complexes of iron and other metals occurring in soil seem to be formed within the micella of clay colloids in the form of relatively highly concentrated solutions of very low volume. After formation, these products diffuse into the outer medium where they become progressively diluted in the presence of the soil solution.

Upon contact of the mineral elements contained in these solutions there occurs a succession of flocculations, and possibly redispersions, leading to complex solutions of higher SiO_2/metal ratios than the ratios in the initial solution, and to flocculates in which the SiO_2/metal ratios decrease to very low values.

By the use of silicic complexes of metals, especially ferrous of ferric iron, prepared in the laboratory, one may attempt to increase the iron content of the soil solution. Experince, however, shows that the maximum concentrations obtainable under conditions approaching those in the natural medium are never really high, irrespective of the product or technique applied.

Передвигательная роль минеральных и органических анионов в геохимических и физиологическх явлениях.

БАСТИС (Версаль).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Металло-кремниевые комплексы железа и других металлов встречающихся в почвах повидимому образовываются внутри мицеллей глинистых коллоидов в виде очень незначительных объемов сравнительно концентрированных растворов.

Когда они образовались, эти образования диффузируют по направлению к внешней среде, где они постепенно растворяются в присутствии почвенных растворов.

При соприкосновении с минеральными элементами содержащимися в этих растворах, происходит ряд последовательных осаждений и возможных новых дисперсий, которые дают в результате с одной стороны растворы комплексов с отношением SiO_2 металл более значительным, чем то что было в первоначальном растворе, и, с другой стороны, осадки где те же отношения SiO_2 металл понижаются и становятся в конечном итоге очень слабыми.

При помощи металло-кремниевых комплексов приготовленных в лаборатории, в частности комплексов железа двухвалентного и трехвалентного, можно пытаться увеличить содержание этого элемента — железа — имеющегося в почвенных растворах. Но опыт показывает, что максимальные концентрации что можно получить в условиях близких к существующим в естественной среде никогда не бывают очень высокими, каков бы ни был испытанный продукт и избранный метод.

ZUSAMMENFASSUNG

Vektorielle Rolle verschiedener Anionen mineralischer oder organischer Natur bei geochemischen und physiologischen Erscheinungen.

Die Kieselsäure-Metallkomplexe des Eisens sowie anderer Metalle welche man im Boden vorfindet, scheinen ihren Ursprung im Keime der Mizellen der Tonkolloïde zu nehmen und dies in Gestalt von stark konzentrierter Lösungen unter kleinsten Volumen.

Nach ihrer Bildung, diffundieren diese Produkte in das äussere Medium wo sie sich in Gegenwart der Bodenlösungen verdünnen.

Bei Berührung der mineralischen Elemente welche diese Lösungen enthal-

ten, entsteht eine aufeinander folgende Reihe von Ausflockungen une evenuetll, erneuter Dispergierungen ; dieselben ergeben, einerseits Komplexlösunlgen mit SiO_2/Metall-Verhältnisse die höher liegen als diejenige der ursprünglichen Lösung und, andererseits, Ausflockungen wo diese SiO_2/Metall Verhältnissə absinken, um schliesslich sehr niedrig zu werden.

Mit Hilfe der im Labor hergestellten Kieselsäure-Metallkomplexe, und ganz besonders der Fe-II- oder Fe-III-Komplexe, kann man versuchen, den Gehalt des, in den Bodenlösungen vorhandenen Element Eisen, zu steigern. Der Versuch zeigt jedoch, dass die maximale Konzentration die man erhält, indem man sich den natürlichen Bedingungen zu nähren sucht, niemals sehr hoch liegen, und dies ohne Ausnahme für die benützten Produkte oder Verfahren.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Demolon (A.) et Bastisse (E. M.). — Rôle vecteur de la silice dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. *Ann Agron.*, p. 265-297, 1944.

(2) Bastisse (E. M.). — Rôle vecteur de divers anions mibéraux ou organiques dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. *Ann. Agron.*, 1re Mémoire, p. 30-57, 1945, 2e Mémoire, p. 434-446, 1946 ; 3e Mémoire, 73-77-1946.

(3) Bastisse (E. M.(. — Essais sur le rôle des complexes colloïdaux métalliques électro-négatifs en pédologie et en physiologie végétale. Thèse de Doctorat d'Ingénieur présentée le 29 avril 1949 à la Faculté des Sciences de Paris.

(4) Demolon (A.) et Bastisse (E. M.). — Sur la présence de complexes pseudo-solubles dans les eaux de drainage. *C. R. Ac. Sc.*, **215**, p. 188-190, 1942.

(5) Demolon (A.) et Bastisse (E. M.). — Rôle de la silice dans la nutrition ferrique des végétaux. *C. R. Ac. Sc.*, **219**, p. 293-295, 1944.

(6) Bastisse (E. M.). — Nouvelles preuves de l'état complexe du Fer dans les eaux de drainage. *C. R. Ac. Sc.*, **229**, p. 521-522, 1949.

(7) Betremieux (R.). — Etude expérimentale de l'évolution du Fer et du Manganèse dans les sol. Thèse d'Ingénieur-Docteur, présentée à la Faculté des Sciences de Paris en 1951. *Ann. Agron.*, p. 193 à 295, 1953.

ANN. AGRONOMIQUES 11 (4, 1960)

631. 46 : 576. 8. 093

8

PRÉCISION DES TECHNIQUES D'ANALYSE ET D'ÉCHANTILLONNAGE EN BIOLOGIE DES SOLS

PAR

Y. DOMMERGUES
O. R. S. T. O. M., Paris.

La qualité d'une étude pédo-agronomique dépend non seulement de la précision des méthodes analytiques utilisées, mais aussi de celle des techniques d'échantillonnage.

Si, dans le domaine de la chimie et de la physique du sol, ces problèmes ont fait l'objet de nombreux travaux, il n'en est pas de même en biologie des sols. Cette note a précisément pour but d'apporter quelques lumières sur la précision de diverses méthodes d'analyse biologique des sols et sur la valeur de deux techniques d'échantillonnage fréquemment utilisées.

I. — Rappel de quelques définitions.

Pour chacune des caractéristiques biologiques étudiées, on a calculé suivant les méthodes habituelles (14, 16, 17) :

— la moyennne : $\bar{x}$

— l'écart-type : S

— l'écart-type de la moyenne : $S_{\bar{x}} = \pm \frac{S}{\sqrt{n}}$

n représentant le nombre d'analyses ou d'échantillons.

— le coefficient de variation : $v = \frac{S \times 100}{\bar{x}}$

— l'indice de précision (ou erreur relative moyenne) : $P = \frac{S_{\bar{x}} \times 100}{\bar{x}}$

Le nombre n d'analyses à effectuer ou d'échantillons à prélever pour obtenir un indice de précision P que l'on se fixe à l'avance est donné par la formule :

$$n = \frac{t^2 \cdot v^2}{P^2}$$

où t = 2 si l'on admet la probabilité 0,05

t = 2,6 si l'on admet la probabilité 0,01.

Inversement, l'indice de précision peut se calculer à partir de la formule :

$$P = \frac{t \cdot v}{\sqrt{n}}$$

II. — Précision des diverses méthodes d'analyses utilisées.

Les numérations des *Azotobacter chroococcum*, des *Beijerinckia indica*, des germes cellulolytiques, des bactéries nitreuses, ont été faites sur milieux classiques au silicogel (15) ensemencés par saupoudrage sur 16 plaques de 12 cm de diamètre (6). La microflore anaérobie du soufre a été dénombrée en utilisant la méthode d'interprétation cinétique d'Augier et Lavergne (2, 3) sur un nouveau milieu (4, 9).

La saccharase a été dosée d'après la méthode Hofmann (13). Le taux d'azote minéralisable a été déterminé suivant la technique Drouineau (10) et le dégagement de gaz carbonique suivant une méthode simple décrite récemment (8). A partir de ces deux derniers chiffres il a été facile de calculer :

— le coefficient de minéralisation de l'azote qui n'est autre que le pourcentage d'azote du sol qui existe sous forme minéralisable,

— le coefficient de minéralisation du carbone qui est, pour le cycle du carbone, le pendant du coefficient de minéralisation de l'azote (8).

Les déterminations du taux de saccharase, d'azote minéralisable et de dégagement de gaz carbonique, résultent d'analyses effectuées en triple exemplaire. L'azote total a été déterminé par la méthode Kjeldahl, la carbone total par la méthode Walkley et le pH a été mesuré sur pâte de sol avec un pH mètre Radiometer muni d'une électrode de verre G 232 A pour milieu semi-solide.

La précision des méthodes d'analyse biologique a été calculée à partir de séries de :

— 20 analyses sur 16 plaques chacune pour les numérations sur silicogel.

— 13 analyses en simple exemplaire pour la microflore anaérobie du soufre,

— 12 analyses en triple exemplaire pour le dégagement de CO_2 et le taux de saccharase.

— 7 analyses en triple exemplaire pour l'azote minéralisable.

Il ressort du tableau I que l'indice de précision pour les numérations sur plaques de silico-gel oscille entre 30 p. 100 et 80 p. 100 ; pour les numérations en milieu liquide, il atteint 120 p. 100 ; pour les déterminations biochimiques (CO_2, azote minéralisable, dosages d'enzymes) il oscille entre 6 et 22 p. 100.

En fait, cette estimation de la précision est entachée d'une erreur

provenant de l'existence à l'intérieur de chaque échantillon de sol d'une microhétérogénéité parfois importante. En effet, quelque soit le soin apporté, il est impossible d'obtenir à partir d'un même échantillon de sol, une série de sous-échantillons présentant des caractéristiques biologiques identiques. Cette microhétérogénéité est très importante lorsque le sol contient des petites particules de matière organique non décomposée qui, lors de la division, se répartissent irrégulièrement dans les sous-échantillons (sol OR).

TABLEAU I

Indice de précision de quelques méthodes d'analyse biologique.

Nature des déterminations	Argile noire tropicale (TH)	Sol ferrugineux tropical non lessivé DIOR (OR)	Sol ferrugineux tropical hydromorphe (DH)	Sol hydromorphe sur alluvions (DL)
Numérations sur silico-gel (lectures portant sur un lot de 16 plaques).				
Densité des *Azobacter chroococcum*	55 %			
Densité des germes cellulolytiques	30 %	80 %		
Densité des bactéries nitreuses	33 %	80 %		
Numérations en milieu liquide : *Microflore anaérobie du soufre* (analyses en simple exemplaire)				
Densité au temps infini				122 %
Densité au 21[e] jour				116 %
Pente de la droite de numération cinétique (+)				55 %
Dégagement de CO_2 (analyses en triple exemplaire)		12 %	6 %	
Azote minéralisable (analyses en triple exemplaire)		22 %	18 %	
Saccharase (analyses en triple exemplaire)		12 %	7 %	

(1) Le sol étudié est caractérisé par une courbe cinétique linéaire.

En ce qui concerne les analyses de carbone et d'azote dans le sol, l'indice de précision serait, suivant les auteurs, de 2 ou 4 p. 100 (11, 12).

III. — Valeur de la technique dite des « échantillons séparés ».

Cette technique d'échantillonnage consiste à diviser la parcelle à étudier en une vingtaine de sous parcelles de surface égale et à n'effectuer les prélèvements que dans n d'entre elles choisies au hasard (n est égal à trois en général). On obtient ainsi n échantillons que l'on analyse *séparément.*

Cette méthode a été testée à la Station Expérimentale de l'Institut pour les Huiles et Oléagineux de DAROU (Sénégal) sur un sol ferrugineux

tropical lessivé à hydromorphie temporaire (1). La parcelle étudiée d'une surface de 243 m² a été divisée en 18 sous-parcelles de 13,5 m² dans chacune desquelles on a récolté un échantillon résultant du mélange de 30 micro-prélèvements répartis systématiquement sur les 13,5 m². C'est à partir de ces 18 échantillons qu'on a calculé les coefficients de variation et l'indice de précision dans le cas du prélèvement de 3 échantillons par parcelle (tableau II).

TABLEAU II

Précision de la technique dite « des échantillons séparés » dans le cas d'un sol ferrugineux tropical lessivé à hydromorphie temporaire de Darou (Sénégal) — juin 1959

Nature des déterminations	Nbre d'échantillons utilisés pour le calcul de v	Moyenne $\bar{x}$	Coefficient de variation v	Indice de précision P obtenu avec 3 échantillons par parcelle
Numérations bactériennes.				
Densité des germes cellulolytiques (en unités par g de sol)	18	1 943	18,1	21
Densité des bactéries nitreuses (en unités par g de sol)	18	525	25,5	29
Densité de la microflore anaérobie du soufre (en milliers par g de sol)	18	47	80,6	93
Pente de la droite de numération cinétique correspondante	18	7	34,8	40
Dosages biochimiques.				
Dégagement de CO_2 (mg de CO_2 dégagé en 7 j par 100 g de sol)	18	53	10,1	12
Azote minéral + Azote minéralisable (p. p. m.)	18	25	14,8	17
Saccharase (1)	18	650	9,7	11
Autres déterminations.				
Carbone total pour mille	18	5,6	9,9	11
Coefficient de minéralisation du carbone	18	2,6	11,5	13
Azote total pour mille	18	0,46	10,8	12
Coefficient de minéralisation de l'azote	18	5,4	11,9	14
pH	18	6,6	2,2	3

(1) Le taux de saccharase est exprimé par le nombre de mg de sucres réducteurs provenant du dédoublement de 10 g de saccharose sous l'action de l'enzyme contenu dans 100 g de sol.

Ce sol ne renfermant que très peu d'*Azotobacter chroococcum* (de 0 à 100 microcolonies par gramme de sol), il n'a pas été possible d'étudier la variabilité de la densité de ce germe. Par contre, on a profité du fait que la microflore anaérobie du soufre y présentait une courbe de numération cinétique sensiblement linéaire pour calculer la variabilité de la pente de la droite correspondante.

Il ressort du tableau II que l'indice de précision obtenu avec trois échantillons par parcelle atteint les valeurs suivantes :

	%
Numérations sur silico-gel	21 à 29
Numérations en milieu liquide	93
Pente de la droite de numération cinétique	40
Déterminations biochimiques..........................	11 à 17
Déterminations chimiques (carbone et azote)	11 à 12

La méthode de travail que nous avons adoptée étant assez proche de celle de ZAKHARCHENKO (17), il nous a paru intéressant de comparer nos résultats avec ceux de cet auteur. En effet, ce dernier est parti d'une parcelle de 224 m², donc d'une dimension très voisine, sur laquelle il a récolté à intervalles réguliers 20 échantillons qui ont été analysés séparément et à partir desquels on a également calculé les coefficients de variation et les indices de précision dans le cas de 3 prélèvements. Il convient toutefois de signaler une différence dans les deux méthodes : alors que chacun des échantillons que nous avons récoltés résultait du mélange de 30 micro-prélèvements répartis sur toute la surface de chaque sous-parcelle, ZHAKHARCHENKO semble avoir effectué ses prélèvements par points. D'autre part, les sols étudiés appartiennent à des types très éloignés puisque dans un cas il s'agit d'un sol ferrugineux tropical lessivé à hydromorphie temporaire du Sénégal, et dans l'autre, il s'agit d'un sérozem gris de Tadjikistan. Quoi qu'il en soit, les résultats de ZAKHARCHENHO sont du même ordre de grandeur que les nôtres (tableau III).

TABLEAU III

Précision de la technique d'échantillonnage dite « des échantillons séparés » dans le cas d'un sérozem clair (d'après ZAKHARCHENKO*).*

Nature des déterminations	Nbre d'échantillons utilisés pour le calcul de v	Moyenne $\bar{x}$	Coefficient de variation v	Indice de précision P obtenu avec 3 échantillons par parcelle
Densité de la microflore totale (en milliers par g de sol)	20	865	38,11	44
Densité des *Azotobacter* (en unités par g de sol)	20	524,5	39,38	45
Densité des germes nitrificateurs (en milliers par g de sol)	19	7,06	63,03	73
Densité des cellulolytiques (en unités sur la surface de la cellulose)	19	6,1	59,0	68

En fait, l'estimation de la précision telle qu'elle résulte de ces calculs, tient compte non seulement de la variabilité dans l'espace des caractéristiques biologiques, que l'on pourrait désigner sous le nom de variabilité à l'échelle de la parcelle ou macrohétérogénéité, mais aussi de la microhétérogénéité ou hétérogénéité de l'échantillon et enfin des imperfections des méthodes de numération ou de dosage.

IV. — Valeur de la technique dite de l' « échantillon composite unique ».

La méthode d'échantillonnage précédente présente l'inconvénient d'exiger au laboratoire l'analyse de trois échantillons par parcelle. Pour réduire le nombre d'analyses nous avons donc adopté depuis plusieurs années une technique consistant à effectuer sur l'ensemble de la parcelle, au minimum 30 micro-prélèvements régulièrement répartis dont le mélange constitue l'*échantillon composite unique*. Dans quelle mesure l'échantillon composite ainsi obtenu représente-t-il la parcelle?

Pour tester cette méthode d'échantillonnage, on a effectué dans 3 types de sols 12 à 16 séries successives de 30 micro-prèlèvements, de façon à obtenir 12 à 16 échantillons composites qui ont été analysés séparément. Il ressort du tableau IV que l'indice de précision atteint les valeurs extrêmes suivantes pour les différentes déterminations dans les deux premiers sols :

	%
Numérations sur silico-gel	37 à 106
Déterminations biochimiques	9 à 27
pH	2 à 7

Quant au troisième type de sol, on y observe une variabilité encore plus élevée qui doit être imputée, au moins partiellement, à la grande surface de la parcelle (1650 m² au lieu de 140 ou 200 m²).

V. — Conclusion.

A. — Précision des techniques d'analyse biologique.

Il est difficile de faire une estimation exacte de la précision des analyses biologiques, car cette estimation est, ainsi qu'on l'a signalé, entachée d'une erreur provenant de l'existence à l'intérieur de chaque échantillon d'une microhétérogénéité qu'il semble malaisé d'éliminer. En effet, si un broyage poussé, suivi d'une fractionnement rigoureux, ne présente aucune difficulté pour des échantillons que l'on soumet à l'analyse chimique, il n'en est plus de même des échantillons de série destinés à l'analyse biologique si l'on veut opérer aussi stérilement

Tableau IV.

Précision de la technique dite de l'« échantillon composite unique »

Type de sol et date de prélèvement	Dimensions de la parcelle	Nature des déterminations	Nombre n de répétitions	Moyenne $\bar{x}$	Coefficient de variation v	Indice de précision P dans le cas de l'échantillon composite unique
Sol ferrugineux tropical lessivé à hydromorphie temporaire de Darou, Sénégal (janvier 1957).	7 m × 20 m	Densité des germes cellulolytiques...	12	702	24,7	49
		Densité des bactéries nitreuses	12	445	53,3	106
		Dégagement de CO_2................	12	52	11,6	23
		Saccharase	12	562	4,7	9
		pH	12	64	0,9	2
Sol hydromorphe de bas-fond sur alluvions, Foulaya, Guinée (mars 1957).	10 m × 20 m	Densité des *Beijerinckia indica*	16	156	50,7	101
		Densité des germes cellulolytiques...	16	2 111	18,4	37
		Densité des bactéries nitreuses.......	16	1 988	32,5	65
		Dégagement de CO_2	16	137	11,4	23
		Azote minéral + Azote minéralisable.	16	79	12,5	25
		Saccharase	16	399	13,4	27
		pH	16	5,7	3,7	7
Sol dunaire peu évolué Malika, Sénégal (septembre 1957).	33 m × 50 m	Densité des *Azotobacter chroococcum*..	16	950	17,6	35
		Densité des germes cellulolytiques	16	484	33,5	67
		Densité des bactéries nitreuses	16	1 727	35,0	70
		Dégagement de CO_2	16	27	16,1	32
		Azote minéral + Azote minéralisable .	16	15	26,9	54
		Saccharase	16	566	19,9	40
		pH	16	8	0,8	2

N. B. — Les densités bactériennes sont exprimées en nombre de microcolonies par gramme de sol, le dégagement de CO_2 en mg de CO_2 dégagé en 7 jours par 100 g de sol, l'azote minéral et minéralisable en p. p. m., la saccharase en nombre de mg de sucres réducteurs provenant du dédoublement de 10 g de saccharose sous l'action de l'enzyme contenu dans 100 g de sol.

que possible. D'autre part, les échantillons étudiés par le biologiste proviennent la plupart du temps des horizons superfiels dont la microhétérogénéité est presque toujours importante et varie fortement d'un type de sol à l'autre.

Quoi qu'il en soit, on peut admettre pour les indices de précision, les ordres de grandeur suivants :

	%
Numérations sur silico-gel	30 à 80
Numérations en milieu liquide	120
Dosages biochimiques	6 à 22
Dosages chimiques (carbone et azote)	4

B. — Techniques d'échantillonnage.

1° Techniques dite « des échantillons séparés ».

On a vu que cette technique consistait à récolter dans la parcelle à étudier, un certain nombre d'échantillons, en général trois, que l'on analyse séparément. Les indices de précision obtenus dans ces conditions dans une parcelle de 200 m² environ dans un sol ferrugineux tropical hydromorphe sont les suivants :

	%
Numérations sur silico-gel	21 à 29
Numérations en milieu liquide	93
Déterminations biochimiques	11 à 17

Cette précision est amplement suffisante compte tenu de celle des méthodes analytiques.

2° Technique dite « de l'échantillon composite unique ».

Cette technique, déjà décrite plus haut, consiste à effectuer sur l'ensemble de la parcelle 30 micro-prélèvements dont le mélange constitue l'échantillon composite unique sur lequel on fait porter l'analyse. Les indices de précision obtenus dans ces conditions dans des parcelles d'une surface de l'ordre de 100 à 200 m² sont les suivants :

	%
Numérations sur silico-gel	37 à 106
Déterminations biochimiques	9 à 27

Si cette deuxième méthode présente l'avantage de ne nécessiter qu'une analyse, elle semble, par contre, moins précise que la précédente. Lorsque les différences existant entre les parcelles soumises aux divers traitements sont peu marquées, il peut être nécessaire de prélever deux ou trois échantillons composites par parcelle, chaque échantillon correspondant à la moitié ou au tiers de la surface de la parcelle.

C. — Conséquences de la grande variabilité dans l'espace des caractéristiques biologiques.

Les différents exemples cités ci-dessus correspondent à des sols relativement homogènes. Mais il est des cas où l'hétérogénéité est beaucoup plus considérable (sols forestiers, sols de montagne). D'autre part, on n'a envisagé ici que l'hétérogénéité à l'échelle d'une parcelle de 200 m² environ ; mais lorsqu'il s'agit d'un bloc expérimental de 1000 m² ou plus, l'hétérogénéité s'aggrave encore. Il est bien rare alors que le biologiste puisse mettre en évidence des différences significatives dans le comportement de la microflore en liaison avec les différents traitements. Dans ces conditions, il est indispensable d'avoir recours à une *méthode de prélevements par couple* (méthode d'appariements) dont l'emploi annule en grande partie les effets de l'hétérogénéité du sol. Cette méthode consiste à définir sur le terrain des couples de parcelles d'une surface de l'ordre de 10 à 30 m² au maximum sur chacune desquelles on effectue une trentaine de micro-prélèvements dont le mélange constitue l'échantillon à analyser. Cette technique nous a donné d'excellents résultats dans l'étude de sols forestiers à condition d'opérer sur un nombre assez élevé de couples (au moins 10).

Bien des échecs en matière de biologie des sols peuvent s'expliquer par la méconnaissance de ces problèmes d'hétérogénéité des caractéristiques biologiques du sol.

RÉSUMÉ

Comme les échantillons de sols présentent toujours une microhétérogénéité importante, on ne peut faire qu'une estimation approximative de l'indice de précision des méthodes d'analyse biologique.

En ce qui concerne l'échantillonnage, on obtient dans le cas de sols homogènes, des résultats relativement satisfaisants en prélevant, par parcelle de 200 m², trois échantillons que l'on analyse séparément, ou à défaut, un seul échantillon composite provenant du mélange d'une trentaine de micro-échantillons prélevés sur l'ensemble de la parcelle.

Lorsque l'hétérogénéité des caractéristiques biologiques du sol à l'échelle de la parcelle et du bloc expérimental, ou macrohétérogénéité, devient considérable, il est nécessaire d'avoir recours à des prélèvements par couples avec de très nombreuses répétitions.

SUMMARY

The precision of analytical techniques and sampling in soil biology.

Due to the fact that soil samples always show a considerable microheterogeneity, the index of precision of methods of biological analysis can only be estimated by approximation.

As far as sampling is concerned, relatively satisfactory results may be obtained with homogenous soils by taking three samples for every 200-sqm plot for separate analysis, or one composite sample consisting of about 30 small samples taken from the entire experimental plot.

If the heterogeneity of the biological characteristics of the soil of the plots or experimental bloc, or the macro-heterogeneity, are considerable, sampling must be done in pairs with a very large number of replicates.

ZUSAMMENFASSUNG

Genauigkeit bei Analyse-und Probesortierungstechniken im Gebiete der Bodenbiologie.

In Anbetracht der beträchtlichen Mikroheterogenität der Bodenproben, kann nur eine annähernde Ergänzung der Genauigkeitsindizien der biologisch-analytischen Methoden ausgemacht werden.

Was die Probesortierung betrifft, so erhält man, im Falle von homogenen Böden, verhältnissmässig befriedigende Resultate indem man in Parzellen von 200m², drei Proben entnimmt und dieselben einzeln untersucht ; doch in Ermangelung solcher, kann man eine einzige Probe, die aus dreissig Mikroproben besteht, und auf der Gesamtfläche der Parzelle zu entnehmen sind, benützen.

Wenn die Heterogenität der biologischen Bodenkarakteristiken in dem Masstab der Parzelle, des experimentellen Blocks oder Makroheterogenität sich bedeutend auswirkt, so ergibt sich die Notwendigkeit einer paarweisen Probenentnahme, die wiele Wiederholungen beträgt.

Точность аналитических методов и взятія проб в почвенной биологии.

И. ДОММЕРГ. О.Р.С.Т.О.М. Париж.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Так как почвенные пробы всегда имеют значительную микрогетерогенность, то можно лишь приблизительно определить степень точности биологических анализов.

Что касается взятия проб, то, в случае гомогенных почв, получаются сравнительно удовлетворительные результаты, когда берется, на площадке в 200 м², три пробы, которые анализируются каждая отдельно, или, в противном случае, одна единственная проба, средняя, получаемая от смешивания около тридцати маленьких проб, взятых на разных пунктах площадки.

Когда гетерогенность биологических характеристик почв в масштабе площадки и экспериментального блока (т. е. макрогетерогенность) становится значительной, то необходимо прибегкуть ко взятию проб пáрами, с очень многочисленными повторными анализами.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Anonyme. — Secteur expérimetal du Sénégal. Le point d'essai de Darou. Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux, Paris (1958).

(2) AUGIER (J.) et LAVERGNE (D.). — La numération des germes telluriques par voie biologique. Une nouvelle méthode d'appréciation : la numération cinétique. I, Exposé général. *Ann. Inst. Pasteur*, **95**, p. 343-353, (1958).

(3) AUGIER (J.). — La numération des germes telluriques par voie biologique. Une nouvelle méthode d'appréciation : la numération cinétique. 2, Interprétation. — *Ann. Inst. Pasteur*, **95**, p. 604-614, (1958).

(4) BARJAC (H. de) et POCHON (J.). — Appréciation de la microflre tellurique anaérobie active sur le soufre organique. *Ann. Inst. Pasteur*, **89**, p. 591-593, (1955).

(5) DEMOLON (A.). — Dynamique du sol. Dunod, Paris (1948).

(6) DOMMERGUES (Y.). — Numération des germes telluriques sur milieux électifs au silico-gel. — *C. R. VI^e Cong. Inter. Sc. Sol.*, Paris, (1956).

(7) DOMMERGUES (Y.). — La numération des ferro-bactéries. — *C. R. VI^e Cong. Intern. Sc. Sol*, volume A, Paris (1956).

(8) DOMMERGUES (Y.). — La notion de coefficient de minéralisation du carbone. *Agronomie Tropicale* **1**, p. 54-60 (1960).

(9) DOMMERGUES (Y.). — Application de la méthode de numération cinétique à la caractérisation de quelques groupements physiologiques de microorganismes telluriques. *Ann. Inst. Pasteur*. **98**, p. 887-901 (1960).

(10) DROUINEAU (G.) et LEFEVRE (G.). — Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. Agr.*, **4**, 19 pages (1949).

(11) DUGAIN (F.). — Sur les méthodes de prélèvement et de la préparation des échantillons de sol. *Fruits*, **13**, 9-10 p. 395-400 (1959).

(12) FERRARI (T. J.) et VERMEULEN (H. B.). — L'incidence de l'hétérogénéité des sols sur les résultats de leur analyse. *Organisation et Rationalisation de l'analyse des sols* O. E. C. E., Paris, p. 125-138 (1956).

(13) HOFMANN (E.) SEEGERER (A.). — Uber das Enzym system unserer Kulturböden (saccharase). *Biochemische Zeitschrift*, **322**, p. 174-9, (1951).

(14) MASSIBOT (J. A.). — La technique des essais culturaux et des études d'écologie agricole. — Georges Frères, Tourcoing (1946).

(15) POCHON (J.). — Manuel technique d'analyse microbiologique du sol. Masson, Paris (1954).

(16) VESSEREAU (A.). — Méthodes statistiques en biologie et en agronomie. Baillière et fils, Paris (1948).

(17) ZAKHARCHENKO (A. F.). — Application de la méthode d'étude statistique des variations dans les recherches microbiologiques. *Pochvovedenie ;* 3, p. 89-94. (Traduction E. JAYET) (1958).

631. 423. 4 : 631. 417

FRACTIONNEMENT PAR DENSITÉ DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS

PAR

M^me C. JEANSON-LUUSINANG.
Laboratoire des Sols, Versailles

8

PLAN DU MÉMOIRE

I. — ÉTAT DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LE SOL.
Principe de fractionnement.

II. — MÉTHODE.
a) Destruction des agrégats.
b) Liquides densimétriques.
c) Matériel.
d) Manipulation.

III. — RÉSULTATS.
a) Reproductibilité.
b) Comparaison de deux techniques. Choix de la prise d'essai.
c) Applications.

IV. — CONCLUSION RÉSUMÉ.

BIBLIOGRAPHIE.

État de la matière organique dans les sols

Principe de fractionnement

La matière organique est présente dans le sol sous deux aspects : une forme grossière constituée par des débris végétaux ou animaux à structure organisée et une seconde forme faite d'une matière plus évoluée de couleur sombre.

Ces deux états existent souvent dans le même échantillon de terre. Ils correspondent à des stades différents de l'évolution de la matière orga-

nique Le premier état est parfois appelé humus brut par certains auteurs (1) ou fraction libre par d'autres (2). Le second est formé d'une matière intimement liée à la partie minérale c'est le complexe argilo-humique. Il confère au sol des propriétés caractéristiques.

Le passage de la matière organique libre à la matière organique liée est réalisé par deux séries de phénomènes qui interfèrent sans cesse dans le sol : les fermentations microbiennes et l'action de la faune hypogée.

Pour caractériser la matière organique d'un sol, il est logique d'en séparer les formes avant de les soumettre à l'analyse chimique. C'est ainsi qu'une méthode de fractionnement quantitative par densité a été mise au point il y a quelques années (2).

La densité de la matière organique pure est de l'ordre de 1, celle de la fraction minérale du sol est de l'ordre de 2,5. Un liquide de densité 2 permet généralement la séparation des deux formes. La matière organique peu évoluée de faible densité surnage, elle est appelée fraction légère ou matière organique libre. La matière organique évoluée associée à la partie minérale (complexe argilo-humique) tombe, c'est la fraction lourde ou matière organique liée.

Méthode

a) **Destruction des agrégats.** — La terre est séchée à l'air et tamisée à 2 mm. Les agrégats englobent mécaniquement des particules minérales, des débris organiques, le complexe argilo-humique et de l'air. Il est donc nécessaire de les détruire pour libérer la matière organique libre et la séparer par densité du complexe organo-minéral. Nous avons utilisé deux techniques : la destruction des agrégats par l'eau et la destruction par le broyage.

La dislocation est facilement obtenue en portant à ébullition l'échantillon de terre dans un peu d'eau chargée en ions Ca pour éviter la dispersion ou encore en l'écrasant au doigt dans l'eau froide. La terre est séchée en milieu alcoolique pour éviter la réapparition de la cohésion qui se produirait par un séchage en milieu aqueux. Ceci rend l'échantillon presque pulvérulent, mais dans certains cas, il reste des morceaux de végétaux.

La destruction par l'eau est longue. Elle peut parfois provoquer la solubilisation de certaines substances et perturber les dosages ultérieurs de carbone et d'azote, ce qui est néanmoins très rare pour la matière organique des sols ayant subi les intempéries de la nature. Pour éviter cette possibilité d'erreur, les agrégats sont détruits par broyage mécanique suivi d'un tamisage à 500 μ. Les débris organiques sont ainsi réduits en fines particules, ce qui rend l'échantillon plus homogène pour les autres dosages et simplifie la manipulation.

La destruction des agrégats par le broyage donne d'ailleurs des résul-

tats très voisins de ceux obtenus par la destruction par l'eau, comme le montre le tableau 1 :

TABLEAU I

Influence du mode de destruction des agrégats sur le fractionnement par densité

(poids des fractions exprimées en milligrammes pour 5 000 mg).

Mode de destruction des agrégats → / Terre ↓	par broyage		par l'eau à froid	
	fraction lourde $d > 2$	fraction légère $d < 2$	fraction lourde $d > 2$	fraction légère $d < 2$
Rendzine........	4 774	113	4 680	125
Mare...........	3 945	859	3 864	889

Remarque. — L'échantillonnage peut être une cause d'erreur importante. La terre à fractionner par densité est hétérogène, de plus le prélèvement est petit (3 à 10 g), en conséquence il est utile de prendre des précautions spéciales pour échantillonner en particulier dans le cas des tourbes. Les débris végétaux qui font parties de la matière organique libre et qui ne traversent pas le tamis de 2 mm sont à rajouter à la matière organique légère lors du fractionnement de l'échantillon.

Constituants organiques

b) **Les liquides densimétriques.** — Les premières séparations par densité de la matière organique du sol ont été réalisées par des solutions aqueuses salines (3). Nous utilisons actuellement des liquides organiques tels que : l'alcool éthylique à 96°, le benzène, le bromoforme pur à 0,5 p. 100 d'alcool et le tétrachlorure de carbone, en réalisant les mélanges suivants :

— soit, bromoforme et benzène ;

— soit, bromoforme et tétrachlorure ;

— soit, bromoforme et alcool éthylique.

Nous employons de préférence ce dernier mélange en raison de sa moindre toxicité.

Préparation : Comme nous l'avons signalé précédemment, la densité des débris végétaux est voisine de 1 et celle de la matière minérale de 2,5. Les densités satisfaisantes pour séparer la matière organique libre de la matière organique liée à la matière minérale varient selon les sols de 1,75 à 2,25. Dans la plupart des cas la densité 2 donne rapidement une bonne séparation.

La quantité de produits à mélanger se calcule en tenant compte de la densité des liquides organiques et de la densité désirée. Le mélange d'un volume d'un liquide de densité 1 avec un volume d'un liquide de densité 3 donne à peu près deux volumes de liquide de densité 2. Appliquons par exemple ce principe au cas d'un mélange de bromoforme et d'alcool éthylique pour obtenir un mélange de densité 2, il faudra ; prendre 100 ml de bromoforme et 90 ml d'alcool éthylique.

1 volume de liquide de densité 1		1 volume de bromoforme de densité	2,9
+ 1 « « «	3	+ 0,82 « d'alcool « «	0,9
donne 2 volumes « «	2	donne 1,82 volume de liquide «	2

Après filtration, il est possible de réemployer le mélange pour 3 à 5 séparations successives. La récupération se fait ensuite par distillation pour éliminer les corps non volatiles que les constituants organiques auraient pu dissoudre. Ces corps fausseraient les dosages ultérieurs en se fixant sur les deux fractions de la matière organique en cours de séparation.

Les produits sont volatiles, la densité varie et il est indispensable de la réajuster après chaque séparation. Le poids du mélange dans une fiole jaugée de 10 ml, nous donne la densité réelle et l'application du principe énoncé ci-dessus, nous permet de calculer la quantité d'un des constituants à rajouter au mélange pour le ramener à la densité choisie.

Choix de la densité : Souvent dans le sol il existe une séparation assez tranchée entre la matière organique libre et la matière organique liée ; en réalité il n'y a pas juxtaposition, mais tous les degrés intermédiaires entre ces deux formes typiques.

Il est possible d'étudier la matière organique d'un sol de deux manières, en réalisant : soit un seul fractionnement, soit plusieurs fractionnements successifs.

TABLEAU II

Fractionnement d'une rendzine

Densités	1,5	1,5-1,75	1,75-2	2-2,25	2,25-2,5	2,5
Masse de chaque fraction pour cent de terre fine..........	3	2,5	11	60,5	2	21
C p. cent de la fraction	35,6	31,5	16,5	11,5	2,57	0,67
C/N de la fraction	20,5	16,4	10,3	9	—	8,25

Dans le premier cas, la densité 2 est couramment employée. Elle sépare, dans l'ensemble, d'une manière assez satisfaisante, la matière organique libre de la matière organique liée. Dans le deuxième cas, pour avoir

des résultats plus précis, on utilise successivement pour le même échantillon, des liquides de densité différente. La fraction dense est chaque fois reprise par un liquide de densité croissante. Soit par exemple une première séparation avec un liquide de densité 1,75, la fraction dense est séparée une deuxième fois par un liquide de densité 2. La fraction de densité supérieure à 2 peut être reprise par un liquide de densité 2,25.

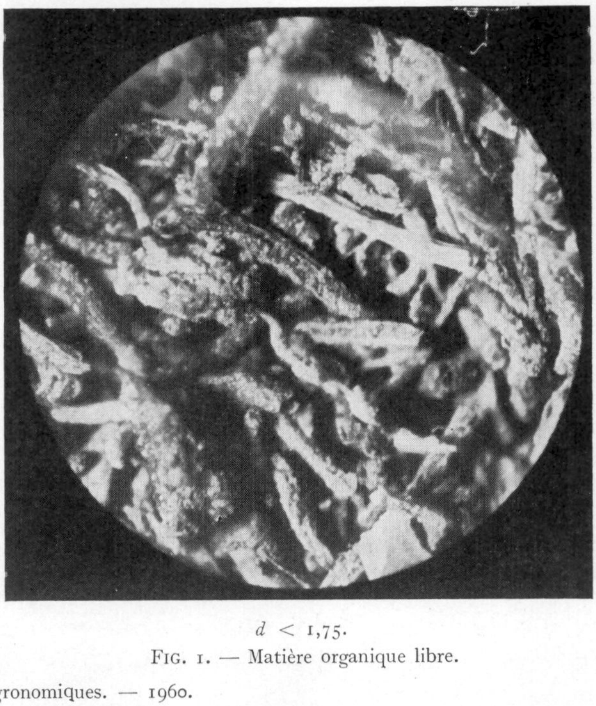
M. TURC (4) a opéré de cette manière et obtenu pour une rendzine les résultats figurant au tableau II. Nous avons pris des clichés de ces fractions (fig. 1 à 5) en mélangeant toutefois les deux parties de densité inférieure à 1,75 qui présentaient le même aspect.

c) **Matériel.** — La séparation de la matière organique libre, de la matière organique liée à la partie minérale a lieu, soit dans des béchers soit dans des entonnoirs.

Le bécher est un matériel très courant au laboratoire, les séparations sont alors réalisées en grande série. Ceci est commode pour les échantillons contenant de la matière organique longue à se séparer. Les béchers de 50 ml forme basse conviennent bien pour des échantillons de 5 g.

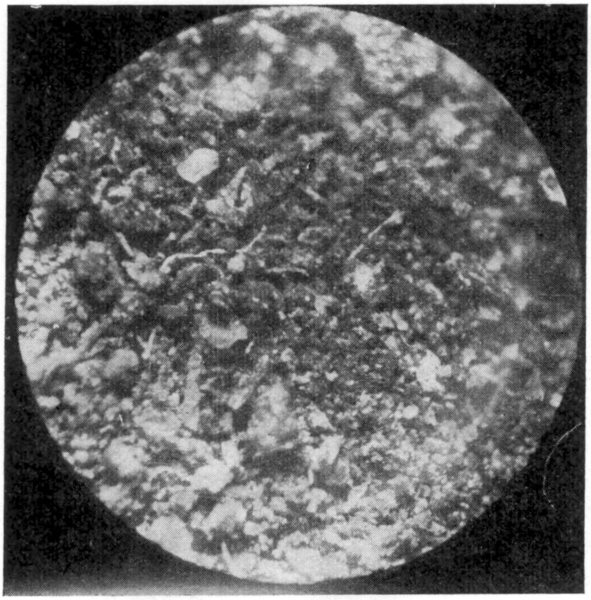
L'utilisation des entonnoirs est récente. Nous avions essayé tout d'abord les ampoules à décantation, mais vue leur écoulement défectueux, nous nous sommes inspirés d'un entonnoir utilisé par certains minéralogistes (5).

FIG. 1 à 5. — Fractions d'une rendzine obtenues par des liquides de densité 1,75 à 2,5



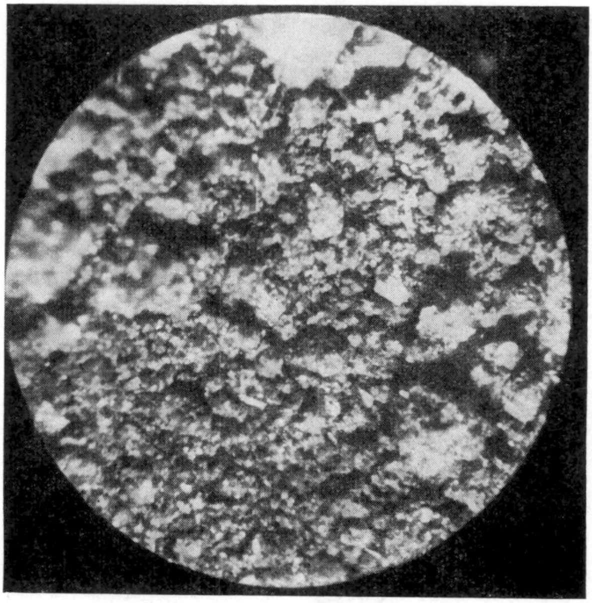
$d < 1{,}75$.

FIG. 1. — Matière organique libre.



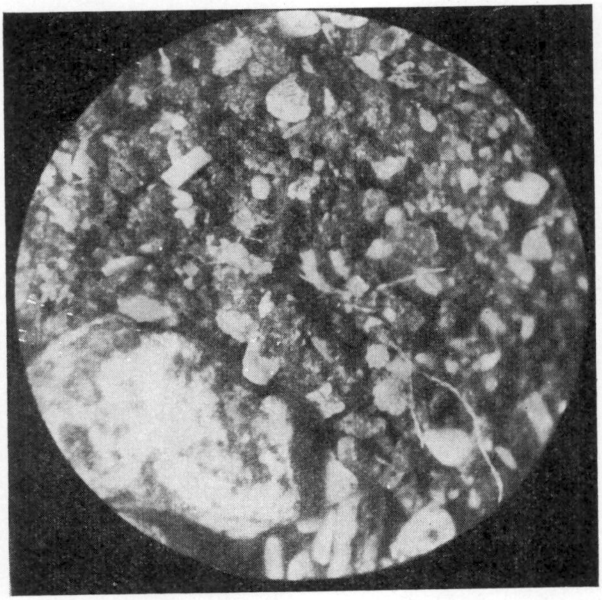
1,75< d < 2.

Fig. 2. — Stade intermédiaire entre Fig. 1 et 3.



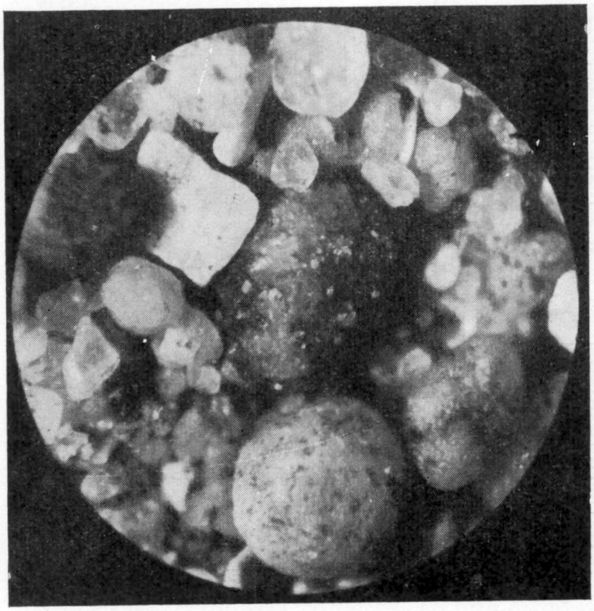
2 < d < 2,25.

Fig. 3. — Complexe argilo-humique.



$2,25 < d < 2,5$.

FIG. 4. — Stade intermédiaire entre FIG. 3 et 5.



$d > 2,5$.

FIG. 5. — Matière minérale (quartz, feldspath, calcaire....)

De 250 ml de capacité, le cône de l'entonnoir est allongé (angle de 35° environ) (fig. 6 et 7), pour mieux séparer les deux phases avec une petite quantité de liquide. La tige porte un robinet rodé, le rodage doit être parfaitement étanche. La graisse entraînant des erreurs dans les dosages ultérieurs, seul le mélange de séparation sert de lubrifiant. Il

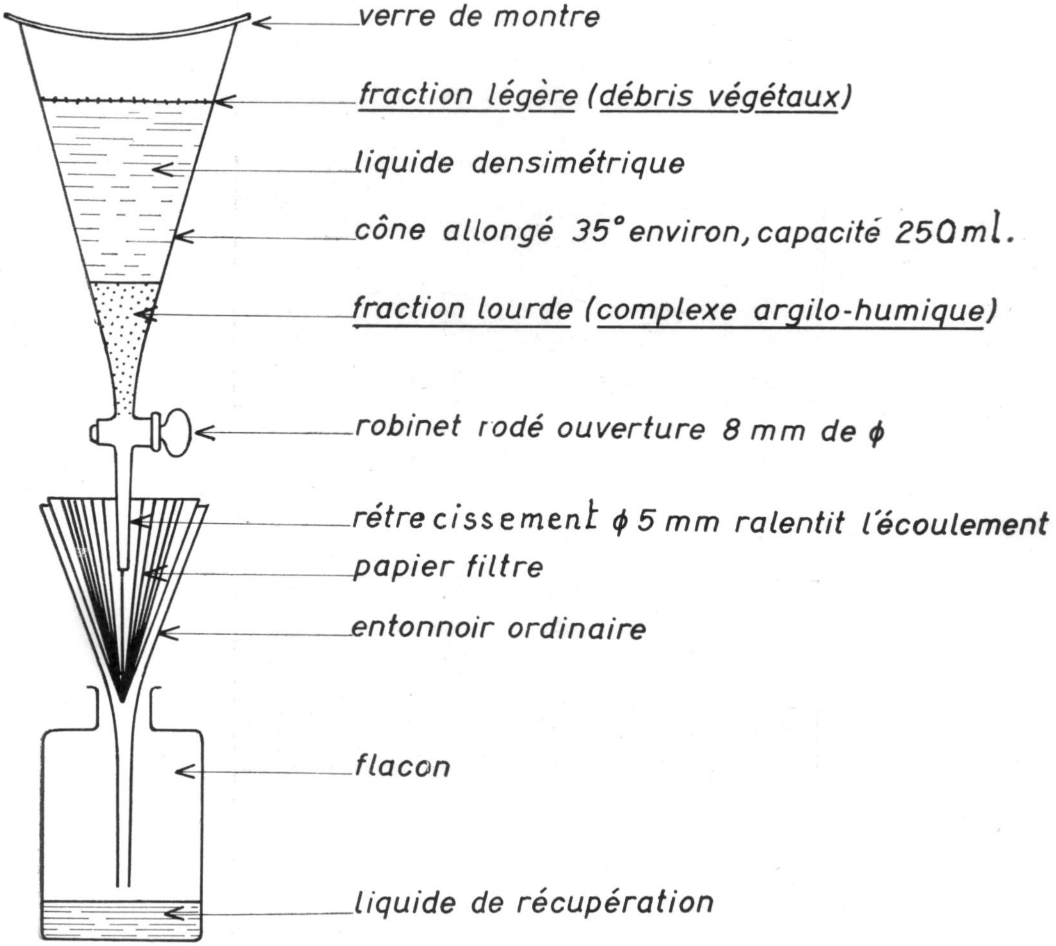


FIG. 6. — Schéma de l'entonnoir à décantation.

semble qu'une gaine de teflon autour du rodage améliore l'étanchéité et facilite la manipulation. L'ouverture de la base de l'entonnoir et celle du robinet coïncident exactement pour éviter l'accrochage des particules de terre ou de débris végétaux, cette position peut-être indiquée par un cran d'arrêt. Elles ont 8 mm de diamètre. Ces ouvertures sont suffisantes pour laisser passer les échantillons broyés à 500 μ. La terre dont les agrégats sont détruits par l'eau conserve d'assez grosses brindilles végétales qui

obstruent le robinet. Ce mode de destruction ne peut donc être utilisé avec le nouveau matériel.

L'extrémité de la tige de l'entonnoir se rétrécit, le diamètre passe de 8 mm à 5 mm, ce qui a pour effet de ralentir l'écoulement et de faire passer la fraction dense sans perturber la fraction légère par des remous.

d) *Manipulation* : Il est préférable de se placer sous une hotte, dans un endroit sans courant d'air et loin de toute source de chaleur. Ceci supprime les courants de convexion à l'intérieur du liquide de séparation et facilite la sédimentation.

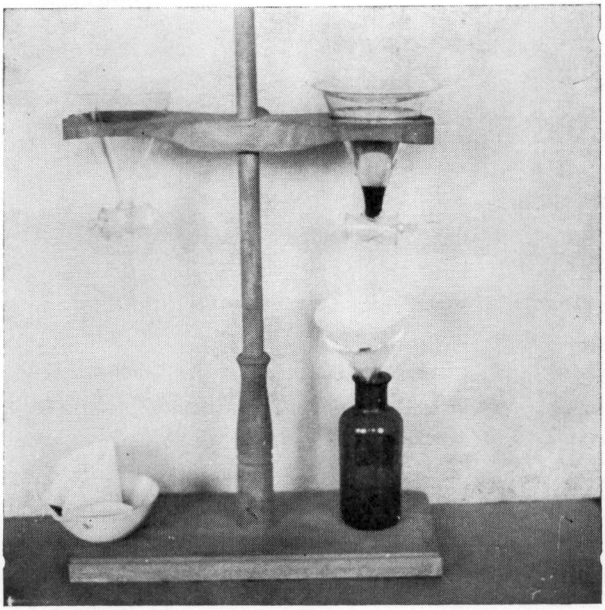


FIG. 7. — Fractionnement par densité avec des entonnoirs à décantation. Montage pour une série de 2.

Les récipients (béchers ou entonnoirs) sont remplis avec le mélange densimétrique aux 2/3 environ. Un avantage des béchers c'est de nécessiter très peu de liquide. L'échantillon de 5 g, préparé comme nous l'avons indiqué plus haut, est versé en pluie en remuant le liquide à l'agitateur. Cette opération facilite la séparation et évite que les débris organiques légers ne soient emprisonnés dans des petites mottes de terre se formant au contact d'un liquide immobile.

La sédimentation des particules suit la tendance générale, plus elles sont fines plus la séparation est longue. Il est préférable de remettre en suspension plusieurs fois la fraction surnageante en agitant avec une baguette de verre, de sorte que les débris végétaux se séparent mieux des

particules lourdes. La sédimentation est terminée lorsque le liquide intermédiaire est clair. La durée varie entre 3 et 15 minutes selon les sols.

Avec les béchers la partie surnageante peut, soit être décantée, soit recueillie avec une petite spatule ou un morceau de papier, puis déposée sur un filtre avec un jet de pissette. Il est aussi possible d'user successivement de plusieurs de ces moyens. C'est la partie délicate de la manipulation. Il est nécessaire de décanter doucement pour que la partie dense glissant rapidement dans le fond du bécher ne passe pas avec la partie surnageante. La fraction lourde est versée sur un deuxième filtre et le bécher rincé avec le liquide organique pour faire passer sur le filtre les particules collées à ses parois.

En ce qui concerne *les entonnoirs,* ils sont recouverts d'un verre de montre, ce qui évite les courants de convexion susceptibles de ralentir ou d'empêcher la séparation nette des fractions. Celles-ci sont recueillies sur un papier filtre posé sur un entonnoir ordinaire que porte un flacon pour la récupération du liquide

Avec les entonnoirs à décantation la partie délicate de la manipulation est l'ouverture du robinet pour faire passer successivement la fraction dense et la fraction légère. Un peu d'entraînement permet d'acquérir assez vite le tour de main nécessaire.

Il importe tout d'abord d'avoir une coïncidence parfaite de l'orifice de la base de l'entonnoir avec celui du rodage du robinet. A l'extérieur deux traits au crayon à verre servent de points de repaire; alignés ils indiquent que l'ouverture est optimum. Sans aucun replat, les particules passeront ainsi directement sur le filtre sans s'accrocher dans le robinet.

La sédimentation terminée, la distance entre les deux fractions ou la hauteur de liquide clair est de 5 à 7 cm dans les entonnoirs courants de 250 ml, selon l'importance relative des deux fractions. Elle est portée à 10 cm dans les entonnoirs spéciaux à cône allongé (35°). Si la fraction légère est faible, elle forme une pellicule de 1 mm à la surface du liquide et la fraction dense une épaisseur de 3 cm dans le fond du cône de l'entonnoir pour un échantillon de 5 g. Si la fraction légère est importante, elle a une épaisseur de 1 à 2 cm et la hauteur de la fraction dense diminue seulement de 1/2 cm. Dans ce cas la hauteur du liquide clair est réduite et il est nécessaire de manipuler plus rapidement pour faire passer les fractions.

Le point délicat est surtout le passage de la fraction dense. Il se fait en une seule fois si les fractions sont bien séparées (échantillon de 5 g.), en deux fois si elles sont rapprochées (échantillon de 10 g.) . Dans ce cas, à la première ouverture du robinet, la plus grande partie de la fraction dense passe sur le papier filtre. Il est souvent nécessaire de prendre deux précautions ; d'une part d'ouvrir légèrement le robinet, d'autre part de rapprocher l'entonnoir ordinaire de la base de l'entonnoir à décantation ;

ceci pour éviter que la fraction dense arrivant sur le papier filtre ne gicle en dehors, Dans sa partie supérieure, elle se remet en suspension et se mélange peu à peu à la fraction légère sous l'influence des remous dûs à l'ouverture du robinet. Les débris végétaux légers restés sur les parois de l'entonnoir à décantation, par suite de la baisse de niveau, sont rassemblés avec un peu de liquide densimétrique. Il est ainsi possible de faire la seconde sédimentation sur le même échantillon comportant cette fois une fraction dense peu épaisse de 1/2 à 1 cm, passant très facilement sur le filtre.

La fraction légère passe sur un deuxième filtre. Un jet de pissette contenant du mélange de récupération rassemble rapidement les particules légères avec peu de liquide.

Dans le cas de la tourbe, riche en matière organique non décomposée, ayant donc une fraction légère très abondante, le passage de la partie surnageante présente quelques difficultés. En effet, si la destruction des agrégats est faite par l'eau, les brindilles végétales même tamisées à 2 mm peuvent provoquer l'obstruction complète du robinet. Le broyage à 500 μ fait disparaître cet inconvénient.

Tous les papiers filtres contenant les fractions lourdes et légères sont rassemblés dans de grandes coupelles et laissés sous la hotte pour une évaporation grossière, celle-ci s'achève à l'étuve de 70° pendant une nuit. Tout le liquide est ainsi évaporé. Les fractions sont récupérées et pesées. Il est recommandé de ne pas gratter le papier filtre, ceci pour éviter que des fragments ne s'en détachent et ne viennent fausser les dosages ultérieurs.

Résultats

a) **Reproductibilité.** — Pour se rendre compte de la précision avec laquelle la matière organique est séparée, il est possible de remettre en suspension la fraction légère et la fraction lourde dans le liquide ayant servi à les séparer. Ceci permet d'apporter une correction aux premiers résultats et de chiffrer les erreurs d'une mauvaise manipulation.

La reproductibilité dépend en partie de la densité du liquide de séparation. Si la densité choisie est voisine de celle du complexe argilo-humique, la reproductibilité est mauvaise et pour que la séparation ait un sens, il faut choisir une autre densité. Signalons que d'après M. Turc « la densité moyenne d'un fraction est approximativement égale à 2,5-2,7 C,C étant la masse de carbone (méthode d'Anne (6)) par unité de masse de la fraction ».

Voici un exemple des résultats obtenus : en fractionnant une terre de limon fumée dans des entonnoirs à décantation :

TABLEAU III

Fractionnement dans des entonnoirs à décantation d'une terre de limon fumée

Poids des fractions exprimés en mg pour un échantillon de 5 000 mg

Essais Nos	Fraction lourde $d > 2$	Fraction légère $d < 2$
1	4 869	20
2	4 867	16
3	4 854	35
4	4 861	35
5	4 875	36
6	4 910	18
7	4 879	26
Moyenne	4 873	26,56
Écart moyen	12,14	7,40

L'erreur sur la fraction légère peut paraître importante, mais il ne faut pas perdre de vue que la prise d'essai est de 5 000 mg.

M. TURC pour les fractionnements en bécher indique une formule pour estimer les erreurs. « En général, si M est la masse de la fraction la plus forte et *m* celle de la fraction la plus faible, l'erreur absolue maximum sur chacune de ces deux masses sera :

$$\frac{M}{200} + \frac{m}{10}$$

si par exemple un échantillon de 5 g est fractionné en 1 000 mg et 4 000 mg, on compte 1 000 mg ± 120 mg et 4 000 mg ± 120 mg ».

Si on applique cette formule à la terre de limon fumée l'écart maximum serait de 27 mg environ, elle est de 10,6 mg avec la séparation dans les entonnoirs. Cette technique semble donc améliorer sensiblement les résultats de la fraction légère.

Il nous est arrivé d'obtenir une meilleure reproductibilité même avec des échantillons contenant une fraction légère plus faible que celle de la terre de limon fumée. Les résultats figurent au tableau IV.

TABLEAU IV

Fractionnement dans des entonnoirs à décantation d'une terre sous prairie

Résultats exprimés en milligrammes pour 5 000 mg.

Essais Nos	Fraction lourde $d > 2$	Fraction légère < 2
1	4 875	11
2	4 920	11
3	4 927	10,5
4	4 935	11
Moyenne	4 914	10,8
Écart moyen	19,7	0,22

L'écart moyen sur la fraction légère est ici de 0,22 au lieu de 7,40 pour la terre de limon fumée.

b) **Comparaison des deux techniques — choix de la prise d'essai.** — Comparons le fractionnement d'un humus de pin sur sable de Fontainebleau obtenu avec les béchers et les entonnoirs. Les résultats figurent au tableau V.

TABLEAU V

Poids des fractions d'un humus de pin

Résultats exprimés en milligrammes pour 5 000 mg

Techniques	Fraction lourde $d > 2$	p. 100	Fraction légère $d < 2$	p. 100
Bécher.........	1 300	26	3 196	62
Bécher.........	1 373	27,5	3 215	62,1
Entonnoir......	1 154	23	3 584	67
Entonnoir......	1 205	24	3 248	62,7

L'accord entre les deux techniques est bon. De plus, nous avons vérifié la composition chimique, par des dosages de carbone et d'azote, de chaque fraction. Les rapports C/N et la teneur en matière organique des fractions sont identiques, quelle que soit la méthode de séparation utilisée.

La décantation de l'humus de pin est rendue difficile en bécher par la présence d'une fraction légère très abondante, il est nécessaire de réduire la prise d'essai. Cette couche épaisse en surface retient souvent des particules denses qu'il est malaisé de décrocher à l'agitateur. Dans les entonnoirs, la même fraction légère est étalée sur une surface beaucoup plus grande, l'épaisseur moindre de la couche légère facilite l'intervention avec une baguette de verre.

Trois à quatre entonnoirs suffisent pour un manipulateur. L'enchaînement des opérations a lieu sans interruption. Le prix de revient de ce nouveau matériel est bien supérieur à celui des béchers, mais la manipulation est considérablement simplifiée.

Le poids de la prise d'essai dépend de l'importance relative de chacune des fractions. Très souvent un échantillon de 5 g convient pour la séparation. Le tableau VI donne quelques résultats obtenus avec des prises d'essai de 3 à 10 g en utilisant des entonnoirs.

TABLEAU VI

Influence de la prise d'essai sur le fractionnement.

Résultats exprimés en milligrammes.

Poids échantillon	Terre d'Antibes				Terre bord d'une mare			
	F L	p cent	f l	p cent	F L	p cent	f l	p cent
3 000........	2 704	90	192	6,4	1 950	65	953	31,76
5 000........	4 647	92	293	5,86	—		—	
	4 540	90,8	262	5,2	—		—	
10 000........	8 873	88,7	640	6,4	6 350	63,5	3 080	30,8

F L = Fraction lourde d > 2.
f l = Fraction légère d < 2.

Les proportions respectives des différentes fractions demeurent très voisines quelle que soit la prise d'essai. Selon l'abondance des parties denses et légères et selon l'importance des dosages à faire sur chacune d'elles, il sera donc possible de fixer la quantité de terre à fractionner, sans pour autant fausser la proportion relative de chacune des deux formes de matière organique.

c) **Applications.** — La méthode de fractionnement de la matière organique par densité a permis de caractériser certains humus, de donner une valeur quantitative aux observations qualitatives des pédologues par l'étude du rapport C/N des différentes fractions de la matière organique du sol (4). Pour les fractions légères ce rapport est voisin de celui de la matière organique fraîche, c'est-à-dire supérieur à 20, pour les fractions lourdes il tend vers 10.

Dans la nature la matière organique libre (débris végétaux) et la matière organique plus évoluée associée à la matière minérale (complexe argilo-humique) existent souvent ensemble. Elles évoluent et migrent différemment dans les sols (7). Elles agissent de plus sur les propriétés physiques des terres et en particulier sur la stabilité structurale (8). La méthode a également permis d'étudier la répartition des éléments fertilisants dans certains sols malgaches (9).

A côté de ce contrôle du milieu naturel, la méthode de séparation par densité a servi à des études de pédologie expérimentale et à l'établissement de bilans de la matière organique dans les sols (10), à des études microbiologiques sur la décomposition des pailles (11) et à l'étude de l'évolution de la matière organique sous l'influence des Lombricides (12).

RÉSUMÉ

La méthode de fractionnement par densité est d'une utilité incontestable chaque fois qu'un échantillon de terre présente un aspect hétérogène. C'est le cas par exemple des rendzines, des différents types d'humus, etc. Elle est aussi intéressante pour toutes les études concernant l'évolution de la matière organique dans le sol.

Un liquide organique sépare les débris végétaux de la matière organique évoluée, liée à l'argile (complexe argilo-humique) grâce à leur différence de densité.

Les agrégats sont détruits soit par l'eau, soit par broyage. Nous recommandons ce dernier procédé plus simple, plus rapide et aussi satisfaisant.

Divers liquides organiques sont employés. Le mélange densimétrique le moins toxique est celui dont les constituants sont l'alcool éthylique et le bromoforme.

Pour la séparation, il est possible de choisir entre les béchers et les entonnoirs à décantation. Ces derniers nécessitent une fabrication très soignée. Les caractéristiques des entonnoirs et leur mode d'emploi sont exposés dans le

texte. Ce nouveau matériel permet d'opérer dans des conditions plus satisfaisantes en particulier pour les échantillons riches en matière organique non décomposée.

Фракционирование органических веществ почвы пользуясь разницей в плотности.

Г-жа ЖАНСОН-ЛЮЗИНАНГ. Почвенная лаборатория. Версаль.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Метод разделения разницей в плотности неоспоримо полезен каждый раз как почвенный образец имеет вид неоднородный. Он интересен также при всяких изучениях эволюции органического вещества в почве. Таков случай, каприемр, рендзин, различных типов гумуса, и т. д.

Растительные остатки отделяются от уже разложившегося и связанного с глиной органического вещества (глино-гумусового комплекса) соответствующей органической жидкостью, благодаря разности в плотности.

Почвенные комки разрушаются или водой, или размельчением. Мы рекомендуем второй способ, более простой, более скорый и достаточный.

Употребляются различные органические жидкости. Наименее ядовитой является смесь этилового алкоголя с бромоформом.

Для разделения, можно пользоваться или обычным стаканом химических манипуляций, или воронкой для декантаций, которая должна быть сделана очень тщательно. Эти воронки и их употребление описаны в тексте. Этот новый материал позволяет оперировать в условиях более удовлетворительных, в частности в том случае, когда образцы почвы богаты неразложившимся органическим веществом.

ZUSAMMENFASSUNG

Trennung der organischen Materie der Böden nach dem spezifischen Gewicht.

Jedesmal, kenn eine Bodenprobe ein heterogenes Aussehen zeitigt, so stellt die Trennung nach dem spezifischen Gewicht eine Technik von unbestreitbarem Wert dar. Ausserdem ist sie von Interesse für all jene Untersuchungen welche die Evolution der organischen Materie im Boden betreffen. Dies ist der Fall, zum Beispiel bei Rendzinen, bei verschiedenartigen Humustypen, usw.

Die Benützung einer organischen Lösung erlaubt es, die Pflanzenreste von der zersetzten organischen Materie welche an die Tone (Ton-humuskomplex gebunden ist, zu trennen ; dieselbe beruht auf den Unterschieden des spezifischen Gewichtes dieser Substanzen.

Die Aggregate werden entweder durch Wasser oder durch Zerreiben zerstört. Letzteres Verfahren, ist wegen seiner einfachen und schnellen Ausführung sowie der gebotenen Genugtuung, zu empfehlen.

Verschiedene organische Lösungen können verwendet werden. Die am wenigsten giftige schwere Lösung ist jene die aus Athanol und Bromoform besteht.

Für die auszuführende Trennung besteht die Möglichkeit, entweder Bechergläser oder Scheidetrichter zu benützen. Letztere bedürfen einer sehr sorgfältigen Herstellung. Die Charakteristiken dieser Trichter sowie ihre Verwendungsart sind im Text angeführt. Dieses neuartige Material erlaubt es, in den befriedigsten Bedingungen zu arbeiten, und dies besonders bei solchen Proben die sehr grosse Mengen unzersetzter organischer Materie aufweisen.

SUMMARY

The fractionation of soil organic-matter by density.

The method using fractionation by density is highly useful whenever a soil sample is of a heterogenous nature. It is also useful for studying the evolution of soil organic-matter, such as in rendzinas, various humus types, etc.

Dne to their different densities, vegetal residues are separated from the organic matter evolved and linked with clay (clay-humus complex) by means of an organic liquid. The aggregates are destroyed by the use of water or by grinding ; the latter technique is simple and also more rapid and satisfactory.

Different organic liquids may be applied ; the least toxic mixture consists of ethyl alcohol and bromoform.

Both beakers and separating funnels may used, but the latter must be of high quality. The properties and use of funnels are discussed, which make a satisfactory operation especially with samples rich in undecomposed organic matter possible.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) KUBIENA (W. L.). — Entwicklungslehre des Bodens, 1 vol., 215 p. Wien p. 72, 1948.

(2) HENIN (S.) et TURC (L.). — Essai de fractionnement de la matière organique du sol. *C. R. Ac. Agr.*, **35**, 1959, p. 41-44.

(3) LEIN (Z. Ya). — Pochvovodenie, nº 10, 1940, p. 41.

(4) TURC (L.). — Sur la matière organique du sol fractionnée par densité. *C. R. Ac. Sc.*, **229**, 1949. p 427-428.

(5) DUPLAIX (Mlle S.). — Laboratoire de Géographie Physique et de Géologie Dynamique Faculté des Sciences. Paris.

(6) ANNE (P.). — Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *An. Agr.*, **15**, 1945, p. 161-172.

(7) TURC (L.) et BETREMIEUX (R.). — Évolution et migration de la matière organique du sol, son influence sur la structure. *C. R. Ac. Sc.*, **238**, 1954 p. 2552-2554.

(8) MONNIER (G.). — Influence du mode d'exploitation des prairies sur la profondeur de leur enracinement, incidence sur l'amélioratiion de la structure et de la stabilité structurale du sol. *C. R. Ac. Agr.*, 1958, 44 p. 388-392.

(9) PERNET (R.). — Mém. de l'Inst. Scient. de Madagascar Série D, Sciences de la terre, Tome IV, 1952.

(10) TURC (L) et HENIN (S.). — Étude des formes de la matière organique dans les sols. Application au milieu naturel, et contrôle des résultats expérimentaux. *Zeit. Planz. Dung. v. Bd.*, **96**, 1955, p. 94-97.

(11) SIMON (Mme G.). — Enfouissement des pailles dans le sol, étude générale et répercussion sur la microflore du sol. Thèse Paris, 1959, p. 39.
(12) JEANSON-LUUSINANG (Mme C.). — Évolution de la matière organique du sol sous l'action de *Lumbricus herculeus* Savigny (Oligochete, Lumbricidae). *C. R. Ac Sc.*, 250 1960. p. 3500-3502.

Le Directeur-Gérant : B. LACLAVIÈRE.

Imprimerie BUSSIÈRE à Saint-Amand (Cher), France. — 18-1-1961.

Dépôt légal : 1er trimestre 1961 *N° d'impression : 376*

546. 472. 84

LES SILICATES DE ZINC ÉTUDE DE PRODUITS DE SYNTHÈSE

PAR

J. ESQUEVIN
Laboratoire des Sols, Versailles.

5/

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

CHAPITRE PREMIER

Technique de préparation.

1. — Principe.
2. — Matériel.
3. — Solution.
4. — Rôle du chlorure de sodium.
5. — Température choisie.
6. — Contrôle de l'expérience.

CHAPITRE II

Techniques d'identification et d'étude.

1. — Rayons X.
2. — Analyse thermopondéral.
3. — Analyse thermique différentielle.
4. — Analyse chimique.
5. — Calcul des formules structurales.
6. — Mesure de la capacité d'échange de cations.

CHAPITRE III

Résultats expérimentaux.

1. — Synthèses n'utilisant que la silice et le zinc.
 a) synthèse dans l'eau pure,
 b) synthèse dans une solution de chlorure de sodium,
 c) synthèse dans lesquelles le zinc est en excès.
2. — Synthèses utilisant la silice, l'alumine, le zinc et magnésium. Influence de l'électrolyte.

CHAPITRE IV

Essai d'interprétation des résultats. — Étude de la précipitation du zinc.

Influence du silicate de soude.
Rôle du chlorure de sodium dans les synthèses.

CHAPITRE V

Étude des produits formés.

1. — Composition minéralogique calculée.
2. — Rayons X.
3. — Perte de poids au-dessus de 350°.
4. — Capacité d'échange de cations.
5. — Variation des teneurs en éléments constitutifs.

Conclusion.

INTRODUCTION

Le présent mémoire est une contribution à l'étude générale des conditions de formation des minéraux argileux. Notre but final est de préciser les processus de ce phénomène dans le milieu naturel et en particulier dans les sols.

Le problème considéré dans son ensemble est le suivant.

Les sols se forment par altération d'une roche-mère. Mais on peut envisager ici deux possibilités. Cette roche-mère est sédimentaire et contient des minéraux argileux. Ou bien il s'agit d'une roche éruptive et les phyllites résultent de l'altération de leurs minéraux et en particulier des feldspaths.

Dans les deux cas, on peut supposer *a priori* qu'en fonction des actions extérieures le minéral argileux peut se former soit par simple diagénèse, la structure du nouveau minéral correspondant à celle du minéral primitif ; soit au contraire par néogénèse, le minéral initial, argileux ou non, subissant une dégradation qui l'amène à l'état amorphe avant qu'il y ait cristallisation d'une nouvelle espèce.

C'est vraisemblablement ce dernier cas que l'on rencontre au cours de l'évolution des feldspaths. En effet, un cristal de feldspath se développe dans les trois dimensions de l'espace. Au contraire les minéraux des argiles ont une structure phylliteuse : ils sont constitués par un empilement de cristallites aplatis en feuillets.

De plus, dans les feldspaths, la charpente cristalline est constituée par des ions oxygène disposés aux sommets de tétraèdres. Les ions métalliques se trouvent au centre de ces tétraèdres ; ils sont donc tétracoordinés, c'est-à-dire liés à quatre ions oxygène.

Dans les phyllites, ce sont encore les ions oxygène qui constituent la charpente cristalline. Mais ils sont répartis dans des plans parallèles. Les ions métalliques se placent dans des plans médians. Il y a deux types différents de liaisons entre ces ions métalliques et les ions oxygène. Les uns sont tétracoordinés comme dans les feldspaths. Les autres sont hexacoordinés. Ils se trouvent alors au centre d'octaèdres.

Dans les minéraux phylliteux, chaque feuillet est constitué par une couche octaédrique recouverte sur une face ou sur les deux faces par une couche tétraédrique. Les couches tétraédriques sont fournies par la silice, les couches octaèdriques par des hydroxydes.

C'est pour ces raisons que nous admettrons que l'altération des roches éruptives a pour effet de détruire complètement le réseau cristallin initial et de faire passer les éléments en solution.

Dans nos essais de synthèse, nous ne nous préoccupons pas de cette première phase de la pédogénèse qui constitue en elle-même un processus très complexe et nous prenons comme point de départ des solutions artificielles obtenues à partir des produits du commerce.

C'est dire que la méthode utilisée est la *méthode expérimentale.*

Elle fournit la possibilité de commencer les recherches à partir de conditions simples et de progresser vers des conditions de plus en plus complexes. De cette façon, il est possible de jouer sur les différents facteurs pris séparément et d'étudier leur rôle.

Il y a là un gros avantage quand il s'agit d'interpréter les phénomènes. En effet l'observation du milieu naturel ne permet en général de mettre en évidence que le résultat de la transformation. L'agent causal, les premiers processus, sont souvent masqués par l'évolution ultérieure du milieu. Il est donc bien difficile, semble-t-il, à moins d'une chance extraordinaire, de saisir à l'aide de cette méthode globale de l'observation le détail de l'évolution des événements. Certes, les résultats de l'expérience doivent être confrontés avec ceux de l'observation, et c'est ce que nous avons fait nous-même dans ce travail.

Aussi, dans toutes nos expériences, notre souci essentiel a été d'opérer dans des conditions qui permettent d'extrapoler les résultats à l'interprétation des processus de la pédogénèse. En particulier, nous avons opéré sous la pression atmosphérique, ce qui constitue une différence essentielle avec les expériences entreprises par d'autres auteurs. De même, il a été établi antérieurement que la température ne faisait qu'accélérer les phénomènes sans en changer la nature.

Les premières tentatives remontent à 1952. A cette époque, S. HENIN et O. ROBICHET ont montré qu'il est possible de préparer des phyllites magnésiennes en faisant écouler lentement dans un ballon des solutions diluées de silicate de soude et de chlorure de magnésium. A partir de cette possibilité il convenait d'étudier le comportement des divers ions sus-

ceptibles d'entrer dans la constitution d'un silicate phylliteux. C'est dans cette perspective que nous avons entrepris l'étude de l'un d'entre eux, le zinc, ce qui nous a conduit à limiter notre travail aux argiles zincifères.

Mais même ainsi limitée dans son étendue, il est bien évident que cette étude n'aurait jamais pu parvenir à son terme, sans les encouragements et les conseils de ceux qui, par leurs travaux, ont acquis une notoriété indiscutable dans le domaine des argiles.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à Monsieur le Professeur Hénin qui m'a accueilli au Laboratoire des Sols en 1949, et qui, tout en m'initiant à la minéralogie des argiles, m'a fait l'honneur de collaborer à ses travaux. Il a su être pour moi le plus précieux des guides.

Je me dois de manifester ma profonde reconnaissance envers Monsieur le Professeur Orcel qui a eu l'amabilité de mettre à ma disposition, les ressources de son laboratoire du Museum National d'Histoire Naturelle, ainsi qu'envers Mademoiselle Caillère dont les conseils s'avèrent toujours très utiles.

Mes remerciements s'adressent également aux membres de mon jury de thèse. Monsieur le Professeur Wyart m'a fait l'honneur d'en assurer la présidence, Monsieur le Professeur Hocart a bien voulu accepter la charge d'en être le rapporteur, Monsieur le Professeur Souchay m'a aimablement encouragé.

C'est grâce à Monsieur Doucet que j'ai eu la satisfaction de découvrir la berthiérine zincifère naturelle. Je le remercie de m'avoir autorisé à puiser dans la collection minéralogique de l'École Nationale Supérieure des Mines.

Il me reste à manifester ma reconnaissance envers la direction de l'Institut National de la Recherche Agronomique et plus particulièrement envers Monsieur Boischot, Directeur de la Station Centrale d'Agronomie, qui a accepté d'assurer l'impression de ce travail.

Pour être complet, je devrais ajouter une longue liste de tous ceux qui m'ont manifesté leurs encouragements ou leur sympathie. Dans cette énumération figureraient en particulier le personnel du laboratoire de Minéralogie du Museum National d'Histoire Naturelle, ainsi que celui du Laboratoire des Sols du Centre National de Recherches Agronomiques de Versailles.

CHAPITRE PREMIER

TECHNIQUE DE PRÉPARATION

1. — Principe

L'appareillage utilisé pour effectuer les synthèses est très simple puisqu'il n'y a pas à faire intervenir le facteur pression. Il doit seulement permettre de réaliser la précipitation simultanée des divers constituants amenés lentement sous forme de solutions très diluées.

La précipitation s'effectue au sein d'une solution saline maintenue à un pH constant et généralement à la température de l'ébullition.

2. — Matériel

Le milieu où s'effectue la synthèse est constitué par un ballon de verre Pyrex de cinq litres de capacité. Dans ce ballon sont placés, en début d'expérience, deux litres d'eau distillée et, le plus souvent, 200 grammes de chlorure de sodium. Le pH de cette solution saline est ajusté à la valeur désirée au moyen de soude. Le tout est maintenu à une ébullition discrète.

Les solutions nourricières qui amènent les éléments constitutifs du produit final sont disposées dans des réservoirs d'un litre de capacité. Ces réservoirs sont constitués par des éprouvettes renversées au-dessus de cuves à niveau constant. Un siphon relie chaque cuve à un tube capillaire qui permet l'écoulement goutte à goutte des solutions nourricières dans le ballon. Un filtre en verre fritté, placé avant le tube capillaire, retient les poussières contenues dans les produits chimiques utilisés pour préparer ces solutions.

L'ensemble réservoir-cuve à niveau constant est solidaire d'une tige métallique qui peut se déplacer verticalement, ce qui permet de régler le débit des tubes capillaires en modifiant la pression qui s'exerce sur eux.

Des réfrigérants, constitués par des tubes de verre de diamètre et de longueur variables, règlent l'évaporation de façon que le volume de la solution contenue dans le ballon reste constamment égal à deux litres.

3. — Solutions

Pour chaque expérience, les solutions nourricières sont réparties dans deux réservoirs différents, à des concentrations de l'ordre du 1/2 au 1/10 de millimolécule par litre.

Dans l'un d'eux on place les éléments stables en milieu acide : acétate de zinc, chlorure de magnésium ; dans l'autre, les éléments stables en milieu alcalin : silicate de sodium, aluminate de sodium. De cette façon,

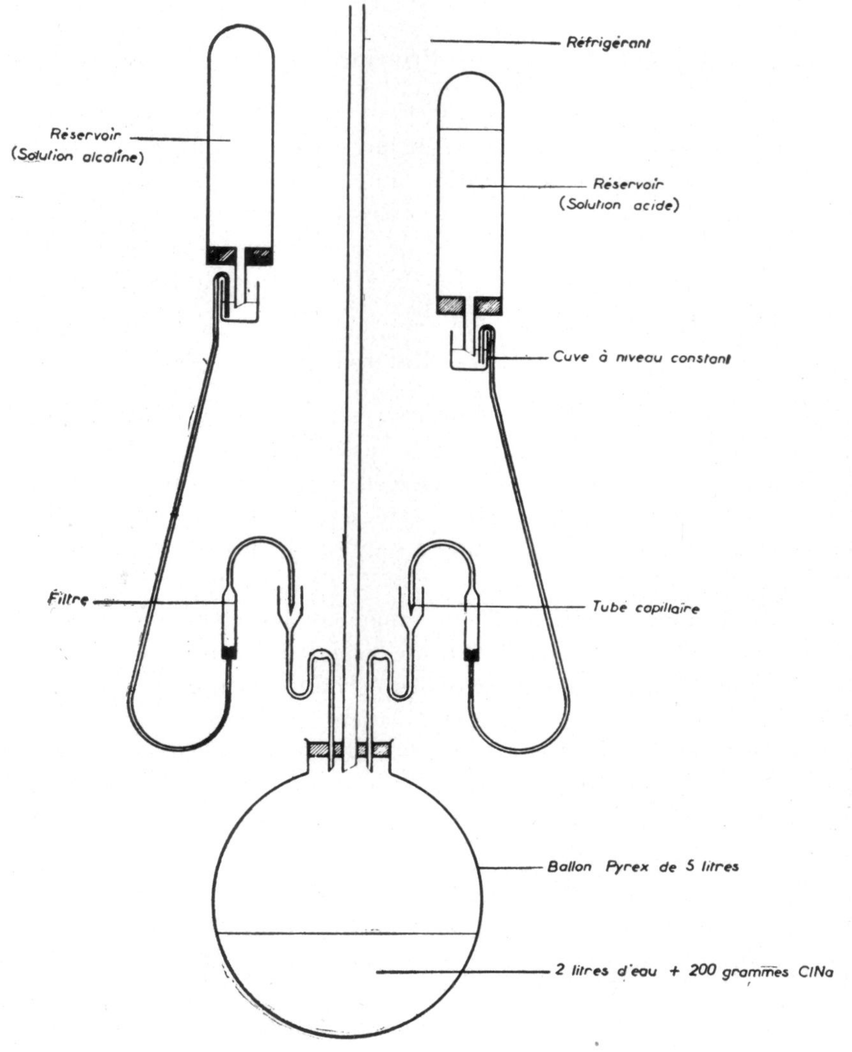


Figure 1 – Schéma de l'appareil.

en ajoutant un peu d'acide ou de soude aux solutions nourricières, il est possible de les stabiliser en empêchant leur hydrolyse possible, celle de l'acétate de zinc en particulier.

D'autre part, l'addition en quantité plus ou moins importante d'acide ou de base aux solutions qui tombent constamment dans le ballon per-

met de régler le pH du milieu de synthèse, qui peut être ainsi facilement maintenu à une valeur à peu près constante.

4. — Rôle du chlorure de sodium

Le rôle du chlorure de sodium ajouté le plus souvent dans le ballon est multiple.

Tout d'abord, il mobilise la silice dont il provoque la dépolymérisation (G. Okamoto, T. Okura, K. Goto, 1957). Il rend donc possible l'utilisation de la silice du silicate de soude apporté au cours de la synthèse. Mais il permet aussi d'employer la silice de la paroi de verre du ballon qui est libérée par la solution saline. Parfois une partie importante, voire la totalité de la silice entrant dans la constitution du silicate formé provient de cette attaque des parois du ballon (S. Henin, O. Robichet, 1954).

D'autre part, une assez forte concentration en chlorure de sodium augmente l'activité de la solution dans laquelle s'effectue la synthèse du silicate. Elle facilite ainsi la combinaison de la silice avec les différents ions apportés par la suite dans le ballon, et la formation du silicate en sera rendue plus rapide.

Enfin les produits obtenus en présence de ce sel sont mieux cristallisés que leurs homologues préparés sans chlorure de sodium.

5. — Température choisie

La température adoptée est celle de l'ébullition.

En effet, les synthèses se font encore à des températures plus basses, à 80°, à 50° et même à 25°, mais la quantité de produit formé est alors très faible, de l'ordre de quelques milligrammes en deux mois à 25°, et leur cristallinité est très mauvaise (S. Caillère, S. Henin, J. Esquevin, 1956).

Au contraire, à 100°, on obtient, dans les cas les plus favorables, jusqu'à 0,5 g, et même davantage, de produit en une semaine.

6. — Contrôle de l'expérience

Pendant toute la durée de l'expérience, le pH est contrôlé chaque jour sur un prélèvement de 10 ml de la solution contenue dans le ballon.

D'autre part, le produit formé est périodiquement décanté et soutiré. Sa nature minéralogique est déterminée au moyen des rayons X.

En général, la production des quatre ou cinq premiers jours n'est pas rigoureusement identique à celle obtenue par la suite. Au départ, en effet, la concentration du milieu de synthèse en éléments constitutifs du silicate

qui doit se former est nulle. Et la nature minéralogique du produit réalisé les premiers jours peut être différente de celle du matériel formé par la suite.

Deux ou trois jours sont en effet nécessaires pour équilibrer le pH de la solution du ballon à la valeur désirée.

De plus, il faut un certain temps avant que s'effectue la mobilisation de la silice (G. Okamoto, T. Okura, K. Goto, 1957), et les produits du début sont en général caractérisés par une forte teneur en cations et un déficit en silice. C'est sans doute la raison pour laquelle la berthiérine se forme presque toujours durant cette première période, même lorsque par la suite seule la saponite sera obtenue (J. Esquevin, 1956).

Enfin au bout de quelque temps, l'équilibre des divers éléments en solution dans le ballon peut être modifié, certains d'entre eux ayant tendance à rester en solution tandis que d'autres se combinent à la silice. Les conditions de l'équilibre chimique ne sont plus alors celles que l'on désire. C'est pourquoi les divers essais sont limités en général à une vingtaine de jours au maximum.

Chapitre II

TECHNIQUES D'IDENTIFICATION ET D'ÉTUDE

Dans ce chapitre, nous énoncerons les caractères utilisés pour déterminer la nature minéralogique des produits de synthèse. Ainsi, lorsque nous dirons par la suite que nous avons obtenu une saponite, c'est que la substance considérée présentera les propriétés d'une montmorillonite trioctaèdrique, caractères que nous préciserons dans les paragraphes qui suivent.

Deux catégories de silicates seront préparés au cours de ces synthèses.

Les uns seront des minéraux phylliteux : saponites et berthiérines zincifères.

Les autres seront constitués par des minéraux à maille tri-dimensionnelle. Il s'agira de la calamine, silicate hydraté orthorhombique de formule $Si_2O_7Zn_4\ (OH)_2.H_2O$; et de la willémite, orthosilicate, anhydre rhomboédrique de formule SiO_4Zn_2.

L'identification de ces produits sera faite au moyen des rayons X, des méthodes thermiques pondérale et différentielle, et de l'analyse chimique.

1. — RAYONS X

Le premier critère est fourni par le diagramme de rayons X.

Les diagrammes sont réalisés avec le rayonnement Kα du cuivre. Chaque fois que cela est possible, un monochromateur à lame de quartz

taillée et courbée donnant une focalisation rectiligne est utilisé. Cette technique permet de déceler dans un mélange la présence de calamine ou de willémite dans les produits argileux. En effet, ces minéraux sont toujours bien cristallisés, même lorsqu'ils sont obtenus par voie de synthèse à 100°.

La SAPONITE est caractérisée par une équidistance maximum de 14 Å. Lorsque l'échantillon est imbibé de glycérol, cette équidistance passe à 18 Å par suite du gonflement intrastructural. Par contre, elle est ramenée à 10 Å si l'on déshydrate la substance par chauffage à 300°. Il est souvent nécessaire d'augmenter la température jusqu'à 500° lorsque le chauffage à 300° n'entraîne pas la modification sensible du diagramme initial.

L'équidistance maximum de la BERTHIERINE est de 7,20 Å. Le diagramme de l'échantillon chauffé à 300° n'est pratiquement pas modifié. Par contre, à 400° la berthiérine est détruite. Imbibée de glycérol, elle ne manifeste pas de gonflement.

Mais la présence sur un même diagramme des deux équidistances à 14 et à 7 Å ne signifie pas nécessairement que l'on a affaire à un mélange de saponite et de berthiérine. C'est le cas en particulier de la sauconite naturelle de Coon Hollow Mine, Boone County, Arkansas, qui est une saponite pure.

Dans le diagramme de ce minéral, la raie à 7 Å correspond au deuxième ordre de la série 001 de la saponite. Elle passe à 9 Å lorsque l'échantillon est imbibé de glycérol et disparaît après chauffage de l'échantillon à 300°. Il ne peut donc s'agir d'une phyllite à 7 Å.

Au contraire, dans les mélanges de saponite et de berthiérine, le diagramme du produit imbibé de glycérol présente les trois équidistances 14, 9, et 7 Å ; et la raie à 7 Å n'est pas détruite après chauffage à 300°.

Au moyen des diagrammes de rayons X nous effectuerons une première évaluation approximative des teneurs en saponite et en berthiérine lorsque ces deux minéraux seront obtenus en mélange. Les évaluations seront faites sur les diagrammes des produits chauffés à 300°. Nous admettrons :

— 100 de saponite, lorsqu'il n'y aura pas de raie d'intensité appréciable correspondant à une équidistance de 7 Å.

— 100 de berthiérine, lorsqu'il n'y aura rien entre 10 et 14 Å.

Pour les valeurs intermédiaires, on procèdera par comparaison avec les diagrammes de mélanges dont les proportions des constituants sont connues.

Il n'est généralement pas possible, avec les minéraux argileux de synthèse, d'obtenir de bons diagrammes d'agrégats sur lesquels l'intensité des raies de la série 001 est renforcée par rapport à celles des séries hko qui sont très faibles. Ceci provient sans doute de la trop grande finesse

des cristallites, c'est-à-dire de leurs trop faibles dimensions dans le plan ab par rapport à leur épaisseur suivant l'axe c, ce qui ne permet pas une orientation préférentielle par sédimentation.

2. — ANALYSE THERMOPONDÉRALE

L'analyse thermopondérale est effectuée au moyen de la thermobalance Chevenard à enregistrement photographique, sur des prises d'essai de 0,5 gramme. On obtient ainsi la courbe de perte de poids en fonction de la température.

Cette courbe est très instructive. Elle indique les températures auxquelles se produisent des variations de poids dues à un processus quelconque. En particulier, elle permet d'évaluer l'importance de la déshydratation par la valeur du pourcentage de la perte de poids. Il est donc possible, dans le cas des mélanges de saponite et de berthiérine de connaître la teneur du mélange en chacun des constituants grâce à la quantité d'eau libérée par la destruction de la couche octaédrique.

Les SAUCONITES présentent un départ d'eau hygroscopique de l'ordre de 9 à 10 p. 100 suivi d'un palier légèrement ascendant et à peu près régulier jusqu'à 600-650°. A cette température s'amorce le départ d'eau de constitution du feuillet qui représente 2 à 3 p. 100. La perte de poids totale est de l'ordre de 14 à 15 p. 100.

Les BERTHIÉRINES subissent une perte de poids de 3 à 5 p. 100 à 150° due au départ de l'eau hygroscopique. La destruction de la couche octaédrique commence vers 350-370°. La perte de poids qui en résulte est de l'ordre de 10 p. 100.

Dans les mélanges des aponite et de berthiérine, l'évaluation de la teneur en chacun des deux minéraux sera faite en posant les proportions suivantes :

— la berthiérine perd 10 p. 100 de son poids au-dessus de 350°;

— la saponite perd 4 p. 100 de son poids au-dessus de 350°.

Ceci étant, si x représente la teneur en saponite $(1 - x)$ représente la teneur en berthiérine. On peut donc écrire :

$4x + 10\,(1 - x) =$ p. 100 H_2O perdue au-dessus de 350°, d'où :

$$x = \frac{10 - \%\ H_2O}{6}.$$

La CALAMINE donne une courbe de perte de poids qui ressemble à celle d'un mélange de saponite et de berthiérine. La calamine, en effet, se déshydrate en deux temps (T. Ito, J. West, 1932). A partir de 350° elle perd progressivement ses molécules d'eau sans que l'édifice cristallin soit modifié. Au-dessus de 680°, il y a destruction du réseau et dissociation

brutale des groupes hydroxyles sous forme d'eau. Ces deux pertes de poids sont d'importance à peu près égale.

La calamine se distingue des mélanges de saponite et de berthiérine par les deux caractéristiques suivantes :

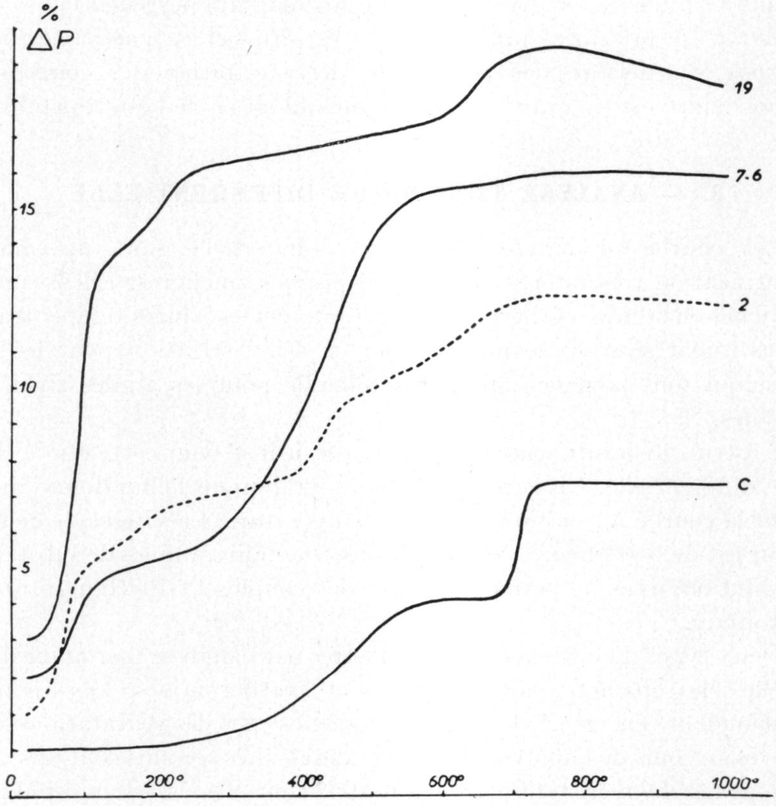


Figure 2 – Courbes de perte de poids des silicates de zinc hydratés.

19 - Sauconite, Coon Hollow Mine, Arkansas.
7.6 - Berthiérine zincifère de synthèse.
2 - Moresnétite (mélange de sauconite et de berthiérine)
C - Calamine, Chodien, Tonkin.

— Elle ne contient pas d'eau hygroscopique.

— La destruction de son réseau cristallin se fait à une température plus élevée que celle de la saponite : 680° au lieu de 600° environ. Et la dissociation des ions OH^- qui s'ensuit est très brutale, tandis que dans la sauconite elle se poursuit sur une centaine de degrés.

La WILLEMITE, orthosilicate anhydre, ne perd pas de poids lorsqu'on la chauffe.

Notons enfin que l'analyse thermopondérale apporte un complément précieux à l'étude par la diffraction des rayons X au sujet de la qualité des produits formés. En effet, si l'on peut déjà se faire une opinion sur la cristallinité d'une substance au moyen des diagrammes de rayons X en considérant le profil des raies des diverses séries et en particulier de la série 001, la netteté des paliers de déshydratation des courbes de thermobalance est un critère peut-être plus tangible de l'état cristallin.

3. — ANALYSE THERMIQUE DIFFÉRENTIELLE

Les courbes d'analyse thermique différentielle sont un moyen d'identification très intéressant pour les argiles zincifères. Elles sont en effet riches en accidents thermiques, surtout vers les hautes températures, et constituent souvent le meilleur moyen d'investigation pour les mélanges, qui sont la règle à peu près générale pour les argiles zincifères naturelles.

C'est un dispositif classique qui a été utilisé pour cette étude thermique différentielle. Un enregistreur photographique Pellin donne directement la courbe ΔT en fonction de la température. La vitesse de chauffe du four est de 600°/heure. Nous utilisons 100 milligrammes de substance, sans dilution, dans de petits godets, et des couples Pt-PtRh à 10 p. 100 de rhodium.

Deux types d'accidents sont enregistrés par l'analyse thermique différentielle : les crochets endothermiques et exothermiques. Les premiers correspondent en général aux phénomènes de déshydratation déjà observés au cours de l'analyse thermopondérale. Les seconds sont dus à des phénomènes de recristallisation ou de transformations polymorphiques.

Au-dessous de 250° il se produit une ou deux inflexions endothermiques dues au départ de l'eau hygroscopique et de l'eau d'hydratation des cations saturant la capacité d'échange (S. B. HENDRICKS, R. A. NELSON, L. T. ALEXANDER, 1940).

Un autre phénomène endothermique correspond à la destruction de la couche octaédrique qui libère une molécule d'eau par demi-maille. La température à laquelle commence cette destruction est de l'ordre de 370° pour la berthiérine zincifère et de 610° pour la sauconite.

Vers 725-740° un phénomène exothermique correspond à la formation de l'orthosilicate à partir de la silice et de l'oxyde de zinc libérés par la destruction du réseau phylliteux (G. T. FAUST, 1951). Suivant la composition du matériel initial, la température à laquelle débute ce phénomène peut varier. Tandis qu'avec la sauconite il ne commence pas avant 740°, avec la berthiérine il débute dès 725°.

Mais l'orthosilicate de zinc peut exister sous trois formes (E. INGERSON, G. W. MOREY, O. F. TUTTLE, 1948). D'où l'existence de plusieurs phénomènes exothermiques correspondant aux transformations polymorphiques. Le terme ultime est toujours α- Si O_4Zn_2, c'est-à-dire la willémite.

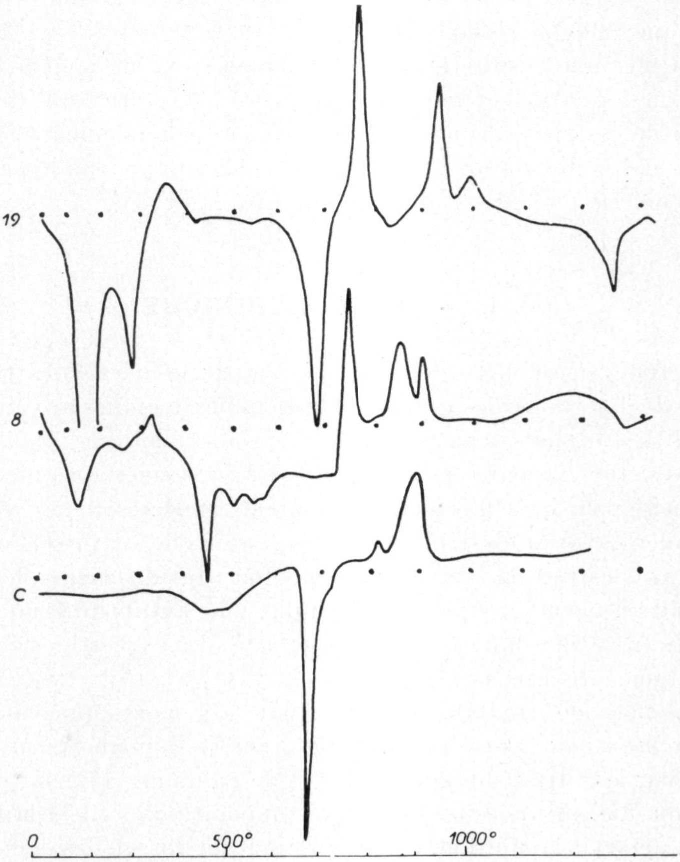


Figure 3 - Courbes d'analyse thermique différentielle des silicates de zinc hydratés.

19 - Sauconite, Coon Hollow Mine, Arkansas
8 - Berthiérine zincifère, Limbourg.
C - Calamine, Chodien, Tonkin.

L'alumine, lorsqu'elle est en quantité suffisante, s'unit à l'oxyde de zinc pour donner le spinelle zincifère, la gahnite. La réaction est exothermique et débute vers 810°. Mais elle est moins nette que la formation et les transformations de l'orthosilicate qui donnaient des crochets aigus ; la formation de la gahnite se traduit par un crochet arrondi.

La CALAMINE donne tout d'abord un large crochet endothermique de faible amplitude entre 380° et 650°. Ce crochet correspond au départ de l'eau de cristallisation (ZAMBONINI, 1908). La destruction du réseau cristallin avec dissociation des ions OH^- se fait à 645-670° (T. ITO, J. WEST, 1932) (G. T. FAUST, 1951), c'est-à-dire à une température plus élevée que celle de la sauconite.

On retrouve ensuite les trois phénomènes exothermiques correspondant à la formation et aux transformations de l'orthosilicate. Mais le premier de ces phénomènes est très atténué : généralement il n'apparaît pas, car il débute trop tôt, avant la fin de la réaction endothermique qui le précède. De plus, il est de faible intensité.

4. — ANALYSE CHIMIQUE

L'étude au moyen des rayons X et par les méthodes thermiques permet de déterminer les grands groupes minéralogiques auxquels appartiennent les produits formés : argile montmorillonitique, phyllite à 7 Å. Mais il est difficile par ces seuls moyens d'en donner une identification très précise pour laquelle l'analyse chimique est nécessaire. Celle-ci permet de calculer les formules structurales des produits de synthèse. Connaissant alors leur constitution cristallochimique, on peut distinguer les diverses espèces d'un même groupe : par exemple, une stévensite d'une saponite dans les montmorillonites, une antigorite d'une berthiérine lorsqu'il s'agit d'une phyllite à 7 Å.

La méthode analytique utilisée fait largement appel aux *dosages complexométriques*. Notre contribution dans ce domaine porte essentiellement sur les titrages directs du fer et de l'alumine qui sont possibles à condition que soient respectés certains impératifs relatifs à la force ionique, au pH, et à la dilution. Comme il s'agit du dosage des deux éléments majeurs des argiles des sols, nous allons donner quelque développement à cette méthode d'analyse. Et tout d'abord, nous énoncerons quelques principes généraux que nous avons dégagés et qui sont valables pour tous les titrages directs.

Force ionique. — Pour rendre les réactions plus nettes, on a intérêt à agir sur l'activité des ions afin de modifier les constantes de dissociation. On y parvient en augmentant la force ionique de la solution au moyen d'un sel neutre. Les ions constitutifs de ce sel ne doivent pas donner de complexes avec l'ion à doser ni avec le complexon.

Cette servitude fait proscrire l'emploi des sels de sodium, surtout en milieu alcalin, car l'ion Na^+ est faiblement complexé par le versénate ($pK = 1,7$). L'ion K^+, plus gros que l'ion Na^+, n'est pratiquement pas

complexé. En général, on utilisera le sulfate de potasse ou un sel quaternaire d'ammonium.

pH. — L'exactitude du dosage dépend du pH choisi pour effectuer le titrage. En effet, la stabilité d'un complexe dépend du pH de la solution.

Si le milieu est trop acide, l'ionisation est forte et le complexe ne peut se former. Mais si le milieu est trop alcalin, l'hydroxyde précipite avant que l'on ait ajouté le complexon. Les conditions optimales de pH sont celles qui correspondent au seuil de précipitation de l'hydroxyde. Comme le pH de ce seuil varie suivant la concentration de l'ion métallique, le pH du milieu devra varier au cours du titrage et être égal, à la fin du dosage, au pH de précipitation totale de l'ion considéré.

Par exemple, le pH de précipitation de l'hydroxyde d'aluminium varie de 3,8 pour une solution 10^{-2}M à 4,5 pour une solution 10^{-5}M. Pour effectuer le dosage direct de l'aluminium, on ajuste la solution à pH 3,8 et on titre par le versénate. Quand l'indicateur (Chromazurol S) vire du bleu à l'orangé, on remonte le pH à 4,5 et on ajoute le versénate jusqu'à ce que la solution prenne la couleur rouge brique.

Les métaux lourds sont dosés vers pH 9-10 après les avoir transformés en complexes aminés afin d'empêcher leur précipitation. Le complexe versénate-métal est plus stable que le complexe aminé. Ce dernier permet d'opérer dans les conditions de pH requises tout en évitant la précipitation des hydroxydes.

Indicateurs. — Dans les titrages directs la fin de la réaction est mise en évidence par un indicateur sensible à la présence de l'ion métallique à doser. Lorsque l'ion n'existe plus à l'état libre dans la solution, la coloration change ou disparaît.

La complexométrie utilise deux catégories d'indicateurs pour ses titrages directs.

Les uns sont des composés incolores qui réagissent avec certains cations métalliques avec développement d'une coloration caractéristique due à la formation d'une entité dans laquelle le cation est le chromatophore. Parmi ces substances, l'acide salicylique est utilisé pour le dosage du fer.

Les autres sont des colorants organiques capables de former des complexes avec les métaux, la formation de ces complexes étant suivie d'un changement de couleur. A ces substances J. KORBL et R. PRIBIL ont donné le nom d'indicateurs « métallochromes ».

Un titrage complexométrique direct revient alors à former au pH convenable un complexe coloré avec le métallochrome. Ce complexe doit être nettement moins stable que le complexe avec le versénate afin que

ce dernier puisse se former au cours du titrage aux dépens du premier. Le métallochrome reprend alors sa coloration propre.

D'autre part, ces indicateurs sont sensibles aux changements de pH. Le Noir ériochrome T, par exemple, est rouge vineux à un pH inférieur à 6, bleu canard entre pH 8 et pH 12, orangé au-dessus de pH 13.

La coloration du complexe métallique est également modifiée par les changements de pH. Le complexe magnésien du Noir ériochrome T est rouge vineux à pH 10,7, bleu à pH 8, ce qui revient à dire qu'à pH 8 le magnésium n'est pas complexé par le Noir ériochrome T. On retrouve donc bien avec ces complexes colorés l'importance de la valeur du pH à laquelle s'effectue le dosage.

Enfin la coloration est modifiée suivant la concentration de la solution en métallochrome.

La force ionique du milieu a également une influence sur la coloration.

Dilution. — Un ion métallique est d'autant plus fortement complexé que sa concentration dans la solution est plus faible.

Si l'ion à doser se trouve à une concentration trop forte, il a tendance à rester à l'état d'ion libre et ceci d'autant plus que la constante de dissociation du complexe est plus grande.

Mais on est limité vers les fortes dilutions par la nécessité d'avoir une coloration suffisamment intense avec le métallochrome. En effet, si l'ion à doser se trouve à une concentration très faible, on ne peut ajouter qu'une petite quantité de métallochrome. Mais alors la solution est trop légèrement colorée pour que le dosage soit possible. On ne peut pas ajouter une quantité excédentaire de métallochrome, car l'excès, non saturé d'ions métalliques, garde la coloration propre de l'indicateur et masque celle du complexe métallique.

Dans la pratique, la concentration de l'élément à doser devra être de l'ordre de 0,5 à 1 millimol par litre. La solution de versénate N/20 (18, 61 g/l) sera introduite dans la solution à titrer au moyen d'une microburette. Il ne faut pas utiliser une solution N/100 avec une burette ordinaire.

Ceci étant, deux attaques différentes sont effectuées sur deux prises d'essai de 200 à 300 milligrammes.

La première attaque est une fusion au carbonate de soude qui permet de doser la silice par insolubilisation en milieu chlorhydrique.

La deuxième attaque par le mélange sulfofluorhydrique permet de se débarrasser de la silice sans introduire d'ions étrangers. C'est sur cette attaque qu'est effectuée l'analyse.

Dosage direct du fer et de l'alumine.

Le fer et l'alumine sont séparés par double précipitation par l'ammoniaque. Le précipité est ensuite dissous par le minimum nécessaire d'acide chlorhydrique. On ajoute 1 à 2 ml d'acide sulfurique et on évapore à fumées blanches afin de chasser l'excès d'ions Cl^-. On reprend par l'eau et on porte à l'ébullition. Après refroidissement, on transvase dans une fiole jaugée et on ajuste au niveau. Les titrations sont effectuées sur des aliquotes de 20 ml.

Le titrage direct du fer et de l'alumine s'effectue en présence de Chromazurol S qui est un métallochrome (A. Musil, M. Theis, 1955) (M. Theis, 1955) (F. Tonani, 1955). 1 mg de Chromazurol S dissous dans 20 ml d'une solution de sulfate de potasse de force ionique égale à l'unité donne à la solution une coloration rouge lorsque le pH est inférieur à 5, jaune entre pH 6 et pH 10, verte à pH 11, bleue à pH 12.

D'autre part, le fer commence à précipiter à pH 2,2, l'alumine à pH 3,8. A ces valeurs du pH le Chromazurol S donne avec les ions à doser des complexes bleus moins stables que les complexes avec le versénate. Les titrages s'effectuent donc de la façon suivante.

Sur une aliquote de 20 ml, on ajoute 1 mg de Chromazurol et on remonte le pH par la potasse jusqu'à ce que la solution prenne une coloration bleue. Le pH est alors légèrement supérieur à 2. On chauffe vers 50° et on titre par une solution de versénate N/20. Il est inutile de tamponner le milieu car il l'est naturellement. Lorsque la solution prend une teinte rouge-orangé, on ajoute quelques gouttes d'un tampon acide acétique-acétate de potasse ou d'ammonium de pH 3,0 et on termine le titrage jusqu'au rouge, qui est la couleur propre du Chromazurol S à cette valeur du pH.

1 ml de versénate N/20 correspond à 2,79 mg de fer ou à 4,00 mg Fe_2O_3.

Le titrage du fer étant terminé, on remonte le pH de la solution jusqu'à ce qu'elle reprenne la coloration bleue (pH 3,8). On chauffe jusqu'à ébullition et on titre l'aluminium par le versénate N/20. Au cours du titrage, on ajoute progressivement goutte à goutte 3 à 4 ml d'un tampon acide acétique-acétate de potasse ou d'ammonium de pH 5. La teinte rouge indique la fin de la réaction.

1 ml de versénate N/20 correspond à 1,35 mg d'aluminium ou à 2,55 mg Al_2O_3.

A titre de vérification, lorsque les dosages directs du fer et de l'alumine sont terminés, on peut effectuer un titrage en retour de la somme fer + alumine (H. Flaschka, H. Abdine, 1955, 1956). Ce titrage est extrêmement précis. Il est effectué après les dosages directs, sur la même aliquote.

Le principe consiste à ajouter un excès de versénate (3 à 4 dixièmes de ml) et à titrer cet excès par le sulfate de zinc. L'indicateur métallochrome du zinc est le Noir ériochrome T. Il est inutilisable car il donne un complexe trop stable avec l'aluminium. La fin de la réaction est mise en évidence par le système ferricyanure-ferrocyanure. En présence de zinc son potentiel d'oxydo-réduction est très élevé par suite de la précipitation du ferrocyanure de zinc et de potassium. Par conséquent, dès qu'il y aura des ions Zn libres dans la solution, le potentiel du système augmentera brusquement.

Dans la pratique, lorsque les titrages directs du fer et de l'alumine sont terminés, on ajoute un excès de versénate. Le pH est ajusté à 6 au moyen d'acétate de potasse. Le Chromazurol S donne alors une coloration jaune à la solution. On ajoute 2 ml d'une solution de ferricyanure de potassium à 0,1 p. 100 fraîchement préparée et une trace de ferrocyanure. On titre par du sulfate de zinc N/20. Le potentiel du système est mesuré au moyen d'une électrode au calomel et d'une électrode de platine. Le titrage doit être effectué très lentement. Le potentiel n'est pas toujours très stable au début, c'est pourquoi l'excès de versénate ne doit pas être inférieur à 3 ou 4 dixièmes de ml. Le point d'équivalence est net. La présence d'ions Cl^-, Na^+, NH_4 fausse le résultat. C'est pourquoi les solutions tampons doivent être réalisées avec l'acétate de potasse.

La différence (versénate total - sulfate de zinc) est égale à la quantité de versénate nécessaire pour complexer le fer et l'alumine.

Cette méthode de dosage donne des résultats assez précis et très reproductibles à condition que les quantités de fer et d'alumine à doser soient de l'ordre de 0,5 à 3 mg pour une aliquote de 20 ml et que la force ionique de la solution soit donnée par le sulfate de potasse.

Cette force ionique qui doit être relativement grande (de l'ordre de 0,5 à 1) est indispensable. Dans le dosage du fer, en effet, il est nécessaire de remonter légèrement le pH vers la fin du titrage pour que la réaction soit complète et pour que le virage du Chromazurol soit net. Mais à cette valeur du pH l'aluminium commence à être complexé. Il l'est d'autant plus que la teneur en aluminium est plus grande par rapport à la teneur en fer et que la température est plus élevée. L'augmentation de la force ionique de la solution permet de relever la valeur du pH à partir de laquelle le complexe AlY peut se former.

Il existe de nombreuses variantes à cette méthode de dosage du fer et de l'alumine. Telle qu'elle vient d'être exposée, elle permet de faire les trois dosages : fer, alumine, fer + alumine, sur la même aliquote.

Mais le fer peut être titré à part en utilisant l'acide salicylique comme indicateur (K. L. Cheng, T. Kurtz, R. H. Bray, 1952). Au point terminal

du titrage la coloration rouge pourpre du complexe ferrique disparaît; mais on ne doit pas atteindre le jaune.

De même, l'alumine peut être titrée séparément. Après avoir remonté le pH jusqu'à ce que la solution prenne une coloration bleue avec le Chromazurol S (pH 2), on ajoute du sulfate d'hydrazine de façon à réduire le fer (W. SCHMIED, L. STEGMÜLLER, 1957). En effet, le fer ferreux ne réagit pas avec le complexon ni avec le Chromazurol. La solution devient rouge. Il ne doit pas y avoir de sulfate d'hydrazine en excès. On remonte alors le pH à 3,8. La solution reprend une coloration violette. On titre par le complexon jusqu'au rouge, comme il est indiqué ci-dessus, c'est-à-dire en remontant simultanément le pH à 4,8.

Enfin, pour la somme fer + alumine, le titrage potentiométrique peut être remplacé par un titrage colorimétrique en utilisant la dithizone en milieu alcoolique au lieu du système ferricyanure-ferrocyanure (G. SCHWARZENBACH, 1957) Ce titrage en retour peut également être utilisé pour le dosage de l'aluminium seul après réduction du fer par le sulfate d'hydrazine.

Quel que soit le mode opératoire utilisé, il n'est pas possible de doser une très faible quantité de l'un des deux éléments en présence d'un gros excès de l'autre. Dans ce cas, seule la somme fer + alumine peut être titrée.

Dosage du calcium et du magnésium.

En l'absence de métaux lourds, le calcium et le magnésium peuvent être titrés directement par le versénate dans la solution ammoniacale résultant de la précipitation du fer et de l'alumine (G. SCHWARZENBACH, W. BIEDERMANN, 1948). En réalité, pour un dosage précis, les sels ammoniacaux doivent être éliminés par calcination, car on ne connaît pas leur concentration. La calcination est obligatoire si la précipitation de l'alumine a été effectuée par le benzoate d'ammonium.

Le dosage est généralement impossible sur la solution provenant de la fusion par le carbonate de soude, car on ne peut pas se débarrasser du chlorure de sodium qui en résulte.

Le complexe calcique est plus stable que le complexe magnésien. De plus les pH de précipitation des hydroxydes sont légèrement différents. Enfin ces deux éléments ont chacun leur métallochrome. Il est donc possible de les titrer séparément lorsqu'ils sont en mélange dans une solution.

On effectue d'abord le dosage du calcium puisqu'il forme un complexe plus stable que le magnésium : pK (Ca) = 10,6 ; pK (Mg) = 8,7.

A une aliquote on ajoute 1 ml de cyanure de potassium à 2 p. 100. Le pH est remonté à 12 par la potasse. On chauffe légèrement et on ajoute

du Noir Bleu au Chrome RF qui donne un complexe rouge avec le calcium. On titre par le versénate jusqu'à ce que le métallochrome vire au bleu qui est sa coloration propre à pH 12 (HILDEBRAND, REILLEY, 1957).

1 ml de versénate N/20 correspond à 2,00 mg de calcium ou à 2,80 mg CaO.

On abaisse le pH à 6 au moyen d'acide chlorhydrique. Le Noir Bleu au Chrome RF sert d'indicateur, car à pH 7 il vire du bleu au rouge. On tamponne le milieu à pH 10,7 avec 5 ml du mélange 50 g $ClNH_4$ + 1 000 ml NH_4OH. On ajoute du Noir ériochrome T qui donne un complexe rouge vineux avec le magnésium. On titre par le versénate jusqu'au bleu canard.

1 ml de versénate N/20 correspond à 1,21 mg de magnésium ou à 2,01 mg MgO.

Ces dosages peuvent être effectués en présence des métaux lourds. Il suffit de les masquer par le cyanure de potassium. Dans les minéraux zincifères il est alors possible de doser le zinc (J. KINNUNEN, B. MERIKANTO, 1952). Il suffit d'ajouter de la formaldéhyde qui détruit le complexe cyané du zinc. Le Noir ériochrome T reprend une couleur rouge vineux. On titre le zinc jusqu'au bleu canard. Le nickel reste complexé par le cyanure.

Lorsque la teneur en magnésium est grande, $Mg(OH)_2$ précipite lorsqu'on ajoute de la potasse pour obtenir pH 12. Ce précipité entraîne du calcium et absorbe l'indicateur.

Dans ce cas, on titre d'abord la somme Ca + Mg à pH 10,7 en présence de Noir ériochrome T.

On verse ensuite une aliquote dans un ballon jaugé, on ajoute un excès de versénate (excès par rapport au calcium à doser) et la potasse nécessaire à l'obtention de pH 12. On ajuste au niveau. On filtre au bout d'un quart d'heure. Sur une aliquote du filtrat on ajoute du Noir Bleu au Chrome RF : la solution est bleue. On verse une solution volumétrique de calcium M/20 jusqu'à coloration rouge, puis un excès de 3 à 4 dixièmes de ml. On titre par le versénate jusqu'au bleu.

Dans le cas des produits de synthèse l'analyse est simple puisqu'il suffit de doser la silice, l'alumine, le zinc et le magnésium.

5. — CALCUL DES FORMULES STRUCTURALES

1er cas : Le minéral est pur

A partir des résultats de l'analyse chimique les formules structurales seront calculées suivant la méthode classique sur la base de 11 atomes d'oxygène pour la demi-maille des phyllites à trois couches, soit 22 va-

lences négatives à neutraliser par des ions chargés positivement ; et de 7 atomes d'oxygène, soit 14 valences à neutraliser pour la demi-maille des phyllites à deux couches.

Pour les montmorillonites trioctaédriques la formule structurale de la demi-maille du produit déshydraté, c'est-à-dire chauffé juste avant la température de décomposition de la couche octaédrique, s'écrit :

$$(Si_{(4-x)}Al_x)\,(Al_yZn_{(3-y)})O_{10}(OH)_2 \cdot M^+_{(x-y)}$$

Si cette montmorillonite est du type stévensite, elle ne présente pas de déficit de charge en couche tétraèdrique qui est uniquement formée par de la silice. Mais la couche octaédrique n'est pas saturée. Sa formule structurale sera donc de la forme :

$$(Si_4)\,(Zn_{(3-z)})O_{10}(OH)_2 \cdot M^+_{2z}$$

Si elle est du type saponite, le déficit de charge est dû à la substitution d'ions Al^{4+} à des ions Si^{3+} dans la couche tétraédrique, ce qui se traduit par une formule structurale de la forme :

$$(Si_{(4-x)}Al_x)\,(Zn_3)O_{10}(OH)_2 \cdot M^+{}_x$$

Il existe tous les intermédiaires entre la stévensite vraie et la saponite vraie qui représentent les termes ultimes d'une série continue S. CAILLÈRE, S. HÉNIN, 1956).

Les phyllites à 7 Å ont des formules structurales qui répondent au type suivant :

$$(Si_{(2-x)}Al_x)\,(Al_xZn_{(3-x)})O_5(OH)_4$$

Le déficit de charge de la couche tétraédrique dû à la substitution d'ions Al^{3+} à des ions Si^{4+} est compensé par l'excès de charge de la couche octaédrique résultant de la substitution d'ions Al^{3+} à des ions bivalents. Les cations d'échange sont pratiquement absents puisque le feuillet est à peu près électriquement neutre. Cependant une capacité d'échange existe. Elle est due aux cations fixés sur le pourtour des minéraux. Nous admettrons qu'elle est voisine de 20 milliéquivalents pour 100 grammes.

2e cas : La montmorillonite et la berthiérine sont en mélange

Lorsqu'on est en présence d'un mélange de saponite et de berthiérine, ce qui sera le cas le plus fréquent, la méthode classique n'est plus applicable. La courbe de perte de poids fait connaître la proportion de chacun des deux minéraux, mais aucune règle générale ne permet de répartir les divers ions entre les deux minéraux si l'on ne pose pas un certain nombre de postulats.

Dans ce cas, le calcul des formules structurales sera effectué après avoir admis un certain nombre de principes.

1\. — Les couches octaédriques des deux minéraux sont saturées, la somme des ions est égale à trois.

2. — Ces couches octaédriques ont la même constitution dans la saponite et dans le minéral à 7 Å.

3. — La capacité d'échange de cations, en plus des 20 milliéquivalents dus à l'effet de pourtour, est attribuable seulement à la montmorillonite. Elle est donc due à un déficit de charges en position tétraédrique.

4. — Cette capacité d'échange C'est égale à la capacité mesurée C à laquelle on retranche 20 milliéquivalents considérés comme effet de bordure, aussi bien pour les corps à 7 Å que pour les corps à 10 Å.

Ceci étant admis, si a et b représentent les quantités respectives de saponite et de berthiérine, C le nombre d'ions échangeables, N le nombre d'ions trouvés à l'analyse :

$$a \{ (4 - x) [Si] + x[Al] + (3 - y) [Zn] + y[Al] \} + C +$$
$$+ b \{ (2 - y) [Si] + y[Al] + (3 - y) [Zn] + y[Al] \} = N$$

D'où l'on déduit :

$$\left| \begin{array}{ll} 4a + 2b - ax - by & = [Si] \\ 3a + 3b - (a + b)y + C/2 & = [Zn] \\ ax + ay + 2\,by & = [Al] \end{array} \right.$$

On a d'autre part :

$$a (x - y) = C' \qquad \text{avec} \qquad C' = C - 20$$

Ce qui permet d'exprimer x en fonction de y :

$$x = C'/a + y$$

Les trois équations précédentes s'écrivent donc :

$$\left| \begin{array}{ll} 4a + 2b - (a + b)y - C' & = [Si] \\ 3a + 3b - (a + b)y + C/2 & = [Zn] \\ 2\,(a + b)y + C' & = [Al] \end{array} \right.$$

La troisième équation donne la valeur de y :

$$y = \frac{[Al] - C'}{2\,(a + b)}.$$

que l'on reporte dans les deux autres :

$$\left| \begin{array}{l} 4a + 2b = [Si] + C' + \dfrac{[Al] - C'}{2}. \\ 3a + 3b = [Zn] - \dfrac{C}{2} + \dfrac{[Al] - C'}{2}. \end{array} \right.$$

On en déduit les valeurs de a et de b et par conséquent les proportions de saponite et de berthiérine dans le mélange :

$$\frac{a}{(a + b)} = \%\ \text{saponite.}$$

$$\frac{b}{(a + b)} = \%\ \text{berthiérine.}$$

Nous avons ainsi une évaluation de la composition minéralogique des mélanges de saponite et de berthiérine.

Par ailleurs, puisque l'on a la valeur de a et de b, on connaît y et par conséquent x :

$$y = \frac{[\mathrm{Al}] - \mathrm{C}'}{2(a+b)}, \qquad x = \frac{\mathrm{C}'}{a} + y.$$

Il est donc possible d'écrire les formules structurales de la saponite et de la berthiérine qui constituent le mélange.

Pour plus de sûreté, on pourra calculer indépendamment les coefficients des divers ions Si, Al, Zn, en écrivant :

— pour la saponite :

$$\left|\begin{array}{l} 4a - ax = [\mathrm{Si}] \\ a(x+y) = [\mathrm{Al}] \\ 3a - ay = [\mathrm{Zn}] \end{array}\right.$$

$$[\mathrm{Si}] + [\mathrm{Al}] + [\mathrm{Zn}] = \mathrm{N}_a$$

— ponr la berthiérine :

$$\left|\begin{array}{l} 2b - by = [\mathrm{Si}] \\ 2by = [\mathrm{Al}] \\ 3b - by = [\mathrm{Zn}] \end{array}\right.$$

$$[\mathrm{Si}] + [\mathrm{Al}] + [\mathrm{Zn}] = \mathrm{N}_b$$

Il suffit de ramener les sommes N_a et N_b des nombres d'ions ainsi trouvés, à 7 pour la montmorillonite et à 5 pour la berthiérine pour établir la formule structurale des minéraux.

Cette méthode de calcul très simple sera d'une grande utilité pour interpréter les analyses chimiques. Sans doute, elle fera apparaître parfois des proportions de saponite et de berthiérine qui ne correspondent pas à la réalité. Mais elle présentera encore le même avantage que la méthode de Cross, Iddings, Pirsson et Washington utilisée par les pétrographes : elle donnera la composition du mélange qui aurait dû se former logiquement avec les éléments mis dans le milieu de synthèse. Il nous appartiendra de rechercher les causes qui ont conduit à un résultat différent.

6. — MESURE DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE CATIONS

La connaissance de la valeur de la capacité d'échange de cations est indispensable pour calculer correctement les formules structurales des minéraux argileux. Elle permet en effet d'évaluer le nombre d'ions destinés à satisfaire à cette capacité d'échange ; puis d'équilibrer la charge positive de ces cations d'échange par un déficit de charge de même valeur dans le réseau du feuillet.

La méthode utilisée pour mesurer cette capacité d'échange de cations consiste à saturer l'argile d'ions NH^+, puis à les déplacer et à les doser par l'acide sulfurique titré. Généralement, ce déplacement des ions NH^+ se fait par distillation dans un appareil à entraînement.

Mais dans le cas des argiles de synthèse, afin de ne pas détruire la

fraction de l'échantillon utilisée pour effectuer cette mesure, les ions NH^+ sont d'abord désorbés de l'argile par des ions Ca^{++}. C'est sur les solutions ayant servi à effectuer cette désorption que la distillation est effectuée.

La technique est alors la suivante :

100 mg d'argile sont placés dans un tube de centrifugeuse avec 10 ml d'une solution d'acétate d'ammonium à 5 p. 100. Le tube est bouché, agité durant une heure, puis centrifugé. Le liquide surnageant est jeté. L'opération est répétée une seconde fois. L'argile est ensuite agitée durant une minute avec 10 ml d'un mélange eau-alcool à 10 p. 100 d'alcool. Après centrifugation, le liquide surnageant est jeté. L'argile ainsi préparée est une argile-NH_4.

Les ions NH^+ sont alors désorbés par des ions Ca^{++} en milieu légèrement acide. L'argile est agitée deux fois en présence de 10 ml d'une solution de chlorure de calcium ajustée à pH6.

Les liquides séparés par centrifugation sont placés dans un matras dans lequel on ajoute 20 ml d'une lessive de soude concentrée. Le matras est fixé rapidement à un appareil à distiller par entraînement avec la vapeur d'eau. L'ammoniac distillé est recueilli dans un flacon contenant de l'acide sulfurique N/10.

Le titrage se fait en retour au moyen de microburettes par l'acide sulfurique N/10. La capacité d'échange de cations de l'argile se lit directement sur la microburette graduée en 1/100 ml.

Chapitre III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Dans une première série d'essais, nous nous proposerons non seulement d'obtenir un produit phylliteux zincifère, mais également de définir les conditions limites de cette formation. Ces renseignements seront importants pour interpréter les faits observés dans le milieu naturel.

Tout d'abord, nous effectuerons la synthèse en faisant écouler dans le ballon uniquement les solutions de silicate de soude et d'acétate de zinc. Nous ferons varier la vitesse d'arrivée de ces solutions de façon à opérer avec des quantités variables de constituants.

Par la suite, quand les conditions de synthèse des phyllites zincifères seront précisées, aux deux solutions déjà utilisées nous ajouterons de l'aluminate de soude et du chlorure de magnésium afin d'obtenir toute la gamme possible des minéraux argileux.

1. — SYNTHÈSES N'UTILISANT QUE LA SILICE ET LE ZINC

a) Synthèses dans l'eau pure.

La silice et le zinc sont amenés lentement goutte à goutte sous forme de solutions diluées de silicate de soude et d'acétate de zinc. Le ballon contient uniquement de l'eau distillée maintenue à un pH constant.

Dans ces conditions, on obtient en général de la calamine, silicate de zinc hydraté de formule $Si_2O_7Zn_4\ (OH)_2.H_2O$. Celle-ci se forme au-dessus de pH 6 quelle que soit la valeur de ce facteur.

Cependant elle n'est pas toujours pure.

Si la vitesse d'écoulement de l'acétate de zinc est très faible, la montmorillonite peut se former, mais seulement vers pH 8, 7, et elle est toujours associée à une quantité plus ou moins importante de calamine.

Par contre, si la vitesse d'écoulement de l'acétate de zinc est trop rapide, la willémite apparaît en mélange avec la calamine à condition que le pH de la solution contenue dans le ballon soit inférieur à 8,5.

Il est possible de l'obtenir sans calamine. Il suffit d'augmenter suffisamment la vitesse d'arrivée de l'acétate de zinc et de maintenir le pH entre 6,8 et 7,2.

En résumé, dans cette série d'essais la formation d'un silicate argileux est très aléatoire. C'est la calamine qui est le minéral caractéristique. Elle se forme toujours quelles que soient les conditions opératoires. La willémite peut apparaître en-dessous de la zone de formation de la montmorillonite.

b) Synthèses dans une solution de chlorure de sodium.

Les mêmes essais que ceux décrits ci-dessus ont été effectués après avoir ajouté 200 g de chlorure de sodium à l'eau distillée contenue dans le ballon.

Le minéral qui se forme alors le plus souvent dans toute la gamme de pH au-dessus de 6,2 est la montmorillonite.

Elle peut se former seule si la vitesse d'écoulement de la solution d'acétate de zinc est constante et suffisamment lente. Sinon, une proportion plus ou moins grande de calamine peut apparaître ; et même un peu de willémite vers pH 7 si l'apport de zinc est trop important.

Par conséquent la présence de chlorure de sodium réduit considérablement les possibilités de formation de la willémite et de la calamine, et permet d'obtenir la montmorillonite dans tout le domaine de pH de précipitation du zinc.

c) **Synthèses dans lesquelles le zinc est en excès.**

Dans tous les essais précédents, lorsque la vitesse d'écoulement de la solution amenant le zinc est accélérée, le résultat final est modifié. C'est la willémite qui apparaît au lieu de la calamine lorsqu'il n'y a pas de chlorure de sodium dans le ballon. C'est la calamine qui se forme au lieu de la montmorillonite lorsque l'on opère dans une solution de chlorure de sodium.

Pour étudier l'influence de la concentration en zinc du milieu de synthèse, une modification a été apportée à la technique utilisée jusqu'ici. Un excès d'acétate de zinc est placé dans le ballon au début de l'expérience en même temps que les 200 grammes de chlorure de sodium. Seule arrive lentement une solution diluée de silicate de sodium.

Dans ces conditions il ne se forme jamais de montmorillonite. Le pH se fixe à 6,4 et la calamine apparaît lentement, collée aux parois du ballon. Si, pour activer le phénomène, on ajoute un peu de soude à la solution de silicate, la willémite est obtenue en mélange avec la calamine et le pH se fixe vers 6,8-7,0. La proportion de willémite croît d'ailleurs si l'on augmente la quantité de soude. La willémite finit par se former seule : le pH final de la solution est voisin de 7,2. Il est même possible d'obtenir un mélange de willémite et d'oxyde en accélérant beaucoup la précipitation du zinc.

Dans un milieu où le zinc est en excès, il est pratiquement impossible de préparer un minéral argileux. La concentration élevée en ions métalliques inhibe la formation des argiles zincifères. Un tel rôle n'a pas été observé dans le cas des argiles magnésiennes et nickélifères, puisque c'est l'antigorite qui est obtenue dans des conditions identiques à celles de la formation de la willémite (S. Caillère, S. Hénin, J. Esquevin, 1956).

Les essais décrits jusqu'à présent en dans lesquels n'entrent et combinaison que la silice et le zinc, montrent l'extrême difficulté que présente la formation de silicates zincifères ayant une structure phylliteuse. Pratiquement, pour les obtenir, il est nécessaire d'opérer en présence d'une solution de chlorure de sodium assez concentrée et d'y maintenir le zinc à l'état fortement dilué.

2. — SYNTHÈSES UTILISANT LA SILICE, L'ALUMINE, LE ZINC ET LE MAGNESIUM

Les conditions de préparation d'un minéral argileux étant ainsi précisées, il nous reste à obtenir et à déterminer le domaine d'existence de la sauconite, saponite zincifère dans laquelle des ions Al^{3+} se substi-

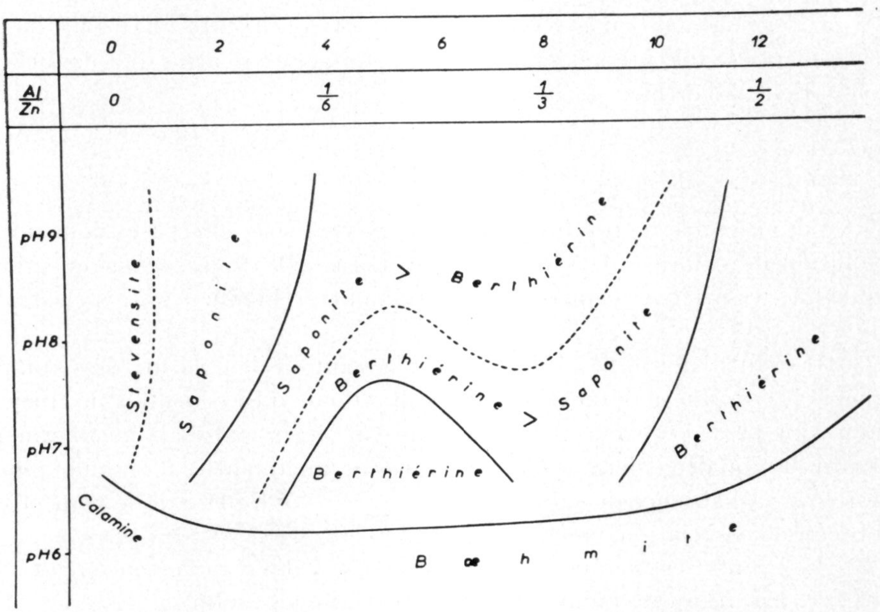
tuent à des ions Si_4^+ dans la couche tétraédrique. Il est alors nécessaire d'introduire un élément nouveau : l'alumine.

Le milieu de synthèse des essais dont il va être question maintenant est constitué par deux litres d'eau distillée dans lesquels sont dissous 200 g de chlorure de sodium ou la quantité moléculaire équivalente d'un autre électrolyte.

Le zinc est amené lentement au moyen d'une solution diluée d'acétate de zinc qui fournit environ 1/2 millimolécule par jour. De l'aluminate de soude est ajouté à la solution de silicate de soude. Enfin du chlorure de magnésium peut être ajouté à l'acétate de zinc.

TABLEAU I

Conditions de formation des phyllites zincifères.



Le rapport Al/Zn des solutions amenées dans le ballon varie systématiquement. Pour chaque valeur de ce rapport, trois essais sont effectués à trois valeurs différentes du pH : 7, 8 et 9.

Le résultat escompté est de préparer des montmorillonites, d'abord de type stévensite lorsque la quantité d'alumine est nulle ou très faible ; puis de type saponite au fur et à mesure que la quantité d'alumine croît. Enfin, lorsque la quantité d'alumine est très forte, le rapport Al/Si ne permet plus la formation d'une saponite : on recueille des aluminates ou des précipités colloïdaux. Les conditions de formation de la sauconite dans la zone supergène seraient ainsi circonscrites.

En fait, les résultats de cette étude sont plus importants. En effet, s'il est possible de préparer des stévensites et des saponites, celles-ci ne représentent qu'une partie des argiles zincifères qui ont été obtenues au cours de ces synthèses.

Dans certaines conditions, il se forme une phyllite à 7 Å que l'étude cristallochimique permettra d'identifier comme l'équivalent zincifère des berthiérines.

S'il est assez difficile d'obtenir cette berthiérine à l'état pur, elle est par contre très largement présente en mélange avec la saponite. Elle peut se former dans toute la gamme de pH étudiée dès que l'on fournit au milieu de synthèse une quantité suffisante d'alumine. Mais on l'obtient plus facilement à l'état pur à pH 7.

On peut schématiser les résultats de cette série d'essais à l'aide d'un graphique où figurent le pH du milieu de synthèse et le rapport Al/Zn des solutions qui s'y écoulent. On obtient le tableau I qui met en évidence le rôle prépondérant du pH et la facilité relative avec laquelle on obtient la berthiérine zincifère à pH 7.

Influence de l'électrolyte.

Cet ensemble de résultats concerne les synthèses effectuées dans une solution de chlorure de sodium 2M, soit 100 g/l. Nous avons effectué quelques essais complémentaires pour montrer l'influence de l'électrolyte.

Il suffit d'ajouter 2 g/l de SO_4Ca à la solution de chlorure de sodium pour obtenir une modification du résultat final. Les saponites occupent alors une place beaucoup plus importante au détriment de la berthiérine. La formation de ce dernier minéral nécessite une quantité d'alumine plus forte qu'en l'absence de sulfate de calcium. Enfin, à pH 9, il ne peut être obtenu en association avec la saponite.

Le résultat est inversé lorsque l'ion Ca se trouve à une concentration élevée. En utilisant comme milieu de synthèse une solution de Cl_2Ca M, on n'observe pratiquement pas de transition entre la stévensite et la berthiérine qui se forme à pH 7 dès qu'il y a un peu d'alumine dans le milieu. A pH 8, la berthiérine pure s'obtient très facilement, mais une certaine teneur en alumine est nécessaire. Il faut que les valeurs du rapport Al/Zn des solutions soient égales à celles qui permettent d'obtenir la berthiérine pure à pH 7 dans une solution de chlorure de sodium 2M. Dans l'intervalle, entre les stévensites et les berthiérines, les saponites se forment. Il n'a pas été possible d'opérer à pH 9 à cause de la précipitation du carbonate de calcium sous forme de calcite.

La particularité de ces synthèses en milieu calcique réside dans ce que l'on pourrait appeler une accélération des résultats. Les étapes inter-

médiaires, représentées par les mélanges de saponite et de berthiérine, n'existent pas : à pH 8, la séquence est stévensite-saponite-berthiérine ; à pH 7, stévensite-berthiérine.

Enfin, pour les valeurs élevées du rapport Al/Zn, des mélanges colloïdaux précipitent, alors qu'avec le chlorure de sodium on obtenait des mélanges de saponite et de berthiérine.

L'influence de l'ion K^+ semble très proche de celle de l'ion Ca^{++} ; il facilite la formation des berthiérines. On pourrait donc dire que, dans nos conditions opératoires, les ions K^+ et Ca^{++} gênent la mobilisation de la silice, tandis que l'ion Na^+ la favorise.

Enfin, l'ion SO_4^{--} inhibe la formation des minéraux phylliteux au profit de la calamine et de la willémite. Il convient de rappeler qu'il facilitait au contraire la synthèse de l'antigorite nickélifère (S. Caillère, S. Hénin, J. Esquevin, 1956).

Chapitre IV

ESSAI D'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ÉTUDE DE LA PRÉCIPITATION DU ZINC

La technique utilisée a donc permis de préparer deux groupes de silicates. Les uns ont une structure phylliteuse, les autres ont une maille tridimensionnelle.

Au cours d'un travail antérieur (S. Caillère, S. Hénin, J. Esquevin, 1953), il a été établi que les minéraux argileux semblent se bâtir par association de la silice avec la brucite en voie de formation. Cependant, dans le cas des argiles zincifères, rien ne permet d'affirmer que la nature du produit final est déterminée au moment de la précipitation du zinc. Il est à peu près impossible d'obtenir un silicate argileux en mélange avec l'hydroxyde brucitique, contrairement à ce qui peut se faire au cours de la formation de l'antigorite nickélifère (S. Caillère, S. Hénin, J. Esquevin, 1956). En effet, si l'on accélère la vitesse de précipitation du zinc de façon à obtenir ce mélange, les minéraux phylliteux ne se forment plus : c'est la calamine ou la willémite qui apparaissent.

La nature du produit final semblerait donc être liée à la vitesse de précipitation de l'hydroxyde de zinc.

Or, cet hydroxyde peut se présenter sous plusieurs variétés allotropiques. Mais il est difficile de raccorder les résultats souvent contradictoires que l'on trouve dans la littérature. Quoi qu'il en soit, l'existence de deux variétés cristallisées ne semble faire aucun doute. Ce sont :

— l'hydroxyde orthorhombique ε $Zn(OH)_2$, qui est la forme stable et qui peut être obtenu en cristaux prismatiques ou aciculaires (R. B.

COREY, R. W. G. WYCKOFF, 1933) (G. GOTTFRIED, H. MARK, 1927) (GOUDRIAAN, 1920);

— l'hydroxyde hexagonal, α Zn $(OH)_2$, qui a la structure de la brucite et qui a toujours été obtenu à l'état cryptocristallin (W. FEITKNECHT, 1930, 1932, 1938).

Les autres formes β-γ-δ Zn $(OH)_2$ sont métastables (W. FEITKNECHT) et leur existence est discutée par de nombreux auteurs.

S'il est exact que la structure d'un silicate est commandée par la structure de l'hydroxyde (S. CAILLÈRE, S. HÉNIN, J. ESQUEVIN, 1953), il est vraisemblable que les conditions d'apparition des minéraux phylliteux sont celles qui permettent la précipitation de l'hydroxyde brucitique. La calamine serait due à la précipitation d'une forme orthorhombique.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons repris certains essais de synthèse. Mais tout apport de silice a été éliminé afin que se produise seulement la précipitation du zinc. Comme une grande partie de la silice provient des parois du ballon, celui-ci a été remplacé par une capsule de platine contenant 300 ml de la solution de chlorure de sodium. La température est de 100° et la durée de l'expérience de un à huit jours.

Les résultats sont les suivants.

1^er^ *Cas* : L'acétate de zinc est placé dans la capsule de platine en début d'expérience (0,5 g/l Zn).

— Si la précipitation se fait lentement au moyen de 2 à 3 ml de soude normale par jour, on recueille un sel basique bien cristallisé.

— Si la précipitation est rapide, l'oxyde apparaît en mélange avec le sel basique.

2^e^ *Cas* : L'acétate de zinc s'écoule goutte à goutte.

— En l'absence de chlorure de sodium dans la capsule, l'hydroxyde orthorhombique ou l'oxyde précipitent au-dessus de pH 7,5 suivant que la vitesse d'écoulement de la solution d'acétate est lente ou rapide. Au-dessous de pH 7,5 le sel basique peut apparaître.

— En présence de chlorure de sodium, on obtient toujours l'oxyde pour les vitesses d'écoulement lentes ou très rapides, l'hydroxyde orthorhombique pour les vitesses d'écoulement moyennes.

Les corrélations entre la formation des silicates et la précipitation des hydroxydes sont alors les suivantes :

— La calamine apparaît quand précipitent l'hydroxyde ou les sels basiques orthorhombiques.

— La willémite et les minéraux phylliteux correspondent à la précipitation de l'oxyde.

Il n'a donc pas été possible d'obtenir l'hydroxyde phylliteux α Zn

$(OH)_2$. Néanmoins il est vraisemblable que cet hydroxyde précipite lorsqu'il y a formation d'un minéral argileux. Mais ses suspensions aqueuses ne sont pas stables lorsqu'on élève la température (W. FEITKNECHT) et il se transforme en oxyde.

Ce comportement existe partiellement pour l'hydroxyde orthorhombique que nous n'avons pu obtenir à l'état pur. Ou bien il entre dans la constitution d'un sel basique lorsque l'acétate de zinc est en excès. Ou bien il se transforme en oxyde lorsque la solution d'acétate de zinc arrive lentement.

Dans l'un et l'autre cas, il est vraisemblable que la silice en se fixant sur l'hydroxyde en voie de formation empêche sa transformation en oxyde. Déjà, en 1906, KURILOV avait montré le rôle de colloïde protecteur joué par le savon de potassium à l'égard des suspensions d'hydroxyde de zinc.

Influence du silicate de soude

Pour vérifier cet effet protecteur de la silice, on a effectué la précipitation du zinc dans les mêmes conditions que précédemment, mais en ajoutant du silicate de soude à la solution de chlorure de sodium contenue dans la capsule.

La silice a une influence incontestable sur la précipitation du zinc. Elle empêche la formation des sels basiques et gêne celle de l'oxyde. Il a été possible d'obtenir ainsi l'oxyde ZnO et l'hydroxyde ε Zn $(OH)_2$ dans les conditions d'apparition respectives de la willémite et de la calamine. Par contre, dans les conditions qui permettent de préparer les minéraux phylliteux, le précipité recueilli est entièrement colloïdal. Et si l'on diminue la quantité de silicate de soude utilisé comme stabilisateur, l'oxyde apparaît, mélangé avec une masse colloïdale.

Par conséquent, même en présence de silicate de soude jouant le rôle de colloïde protecteur, il n'a pas été possible d'observer α Zn $(OH)_2$. Cet hydroxyde brucitique n'a pu être préparé qu'à froid dans les conditions de formation des minéraux phylliteux. Cependant il est probable que la préparation d'une argile zincifère nécessite la précipitation de α $Zn(OH)_2$, la silice se fixant sur lui au cours de la précipitation. L'édifice cristallin du silicate formé est alors stable jusqu'à 380° dans le cas des minéraux à deux couches et jusqu'à 600° dans le cas des minéraux à trois couches.

Rôle du chlorure de sodium dans les synthèses

Ces essais dans un récipient de platine destinés à montrer l'influence de la silice sur la précipitation du zinc, fournissent un autre résultat intéressant. La silice apportée par le silicate de soude ne se combine pas au zinc pour donner un silicate cristallisé. Il y a seulement modification du résultat de la précipitation.

TABLEAU 2

Analyse chimique des produits de synthèse (calcinés à 1000°).

		0	1	2	3	4	5	6	8	10	11	12	16
$\frac{Al}{Zn}$ des solutions		0	1/24	1/12	1/8	1/6		1/4	1/3			1/2	2/3
pH 9	SiO_2	52.0	50.2	50.9	49.5	45.7	43.2	46.9	47.8	40.7	40.8	22.0	
	Al_2O_3	-	4.6	5.3	6.1	6.8	12.2	15.0	16.2	17.3	18.9	32.1	
	ZnO	34.5	33.9	31.9	33.8	35.9	36.7	29.7	30.3	33.4	28.2	34.8	
	MgO	12.4	11.3	10.5	9.9	10.6	7.4	7.1	6.4	8.4	12.0	10.3	
		98.9	100.0	99.6	99.3	99.0	99.5	98.7	100.7	99.8	99.9	99.2	
pH 8	SiO_2	54.2	52.8	52.1	51.0	43.0	45.2	51.5	48.4	35.6			
	Al_2O_3	-	5.1	9.7	10.5	12.6	15.2	15.4	18.4	20.6			
	ZnO	31.7	28.2	25.6	26.2	37.2	27.8	21.3	24.6	32.6			
	MgO	13.8	13.5	12.0	11.6	6.9	11.2	11.9	8.2	10.4			
		99.7	99.6	99.4	99.3	99.7	99.4	100.1	99.6	99.2			
pH 7	SiO_2	50.6	52.0	45.0	41.2	21.7	25.5	30.6	37.6	26.7		20.2	8.9
	Al_2O_3	-	2.3	6.5	13.3	23.1	20.5	34.3	22.6	26.6		33.5	87.8
	ZnO	41.3	36.1	44.1	40.0	53.6	52.5	30.0	31.7	44.5		40.4	3,6
	MgO	7.3	8.9	3.8	5.4	1.6	1.3	5.0	8.2	2.3		5.4	-
		99.2	99.3	99.4	99.9	100.0	99.8	99.9	100.1	100.1		99.5	100.3

TABLEAU 3

Analyses chimiques des produits de synthèse exprimées en ions-gramme pour 100 grammes.

		0	1	2	3	4	5	6	8	10	11	12
	Si	866	836	848	825	761	720	781	797	678	680	366
	Al		92	106	122	136	244	300	324	346	378	642
pH 9	Zn	426	424	399	422	449	459	371	379	417	352	435
	Mg	310	282	262	247	265	185	177	160	210	300	257
	C.E.C	58	68	74	75	63	63	70	82	115	114	48
	Si	903	880	868	850	717	753	858	807	593		
	Al		102	194	210	252	304	308	368	412		
pH 8	Zn	396	352	320	327	465	347	266	308	401		
	Mg	345	337	300	290	172	280	297	206	260		
	C.E.C	48	70	111	114	74	66	80	83	113		
	Si	843	866	750	687	361	425	510	626	445		336
	Al		46	130	266	462	410	686	452	532		670
pH 7	Zn	516	451	551	500	670	648	375	396	556		505
	Mg	182	222	95	135	40	32	125	205	70		135
	C.E.C	58	69	88	104	53	31	48	62	56		24

TABLEAU 4. — *Composition minéralogique et formules structurales des produits formés à pH 9.*

	4a + 2b 3a + 3b	2a + b a + b a	Calcul % Saponite	Rayons X % Saponite	Perte de poids au-dessus de 350° % eau	 % Saponite	Capacité d'échange de cations	Formules structurales. (Saponite) (Berthiérine)	Rapports Al/Zn	 Al/Si	 Si/Zn
9.0	866 + 38 − 19 = 885 736 − 29 − 19 = 688	442 229 213	93	100	4.3	95	58	$(Si_4)\ (Zn_{1.58}\ Mg_{1.30})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.26}$	0	0	1.18
9.1	836 + 48 + 22 = 906 706 − 34 + 22 = 694	453 231 222	96	100	5.6	74	68	$(Si_{3.68}\ Al_{0.32})\ (Al_{0.10}\ Zn_{1.83}\ Mg_{1.07})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.29}$ $(Si_{1.90}\ Al_{0.10})\ O_5\ (OH)_4$	0.13	0.11	1.17
9.2	848 + 54 + 26 = 928 661 − 37 + 26 = 650	464 217 247	100	100	4.2	97	74	$(Si_{3.71}\ Al_{0.29})\ (Al_{0.18}\ Zn_{1.87}\ Mg_{0.88})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.35}$	0.16	0.12	1.29
9.3	825 + 55 + 34 = 914 669 − 37 + 34 = 666	457 222 235	100	100	4.2	97	75	$(Si_{3.62}\ Al_{0.38})\ (Al_{0.16}\ Zn_{1.88}\ Mg_{0.94})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.34}$	0.18	0.15	1.23
9.4	761 + 43 + 47 = 851 714 − 31 + 47 = 730	425 243 182	75	90	5.2	80	63	$(Si_{3.59}\ Al_{0.41})\ (Al_{0.17}\ Zn_{1.86}\ Mg_{0.97})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.26}$ $(Si_{1.83}\ Al_{0.17})\ O_5\ (OH)_4$	0.19	0.18	1.07
9.5	720 + 43 + 101 = 864 644 − 31 + 101 = 714	432 238 194	82	90	5.2	80	63	$(Si_{3.36}\ Al_{0.64})\ (Al_{0.42}\ Zn_{1.93}\ Mg_{0.65})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.26}$ $(Si_{1.58}\ Al_{0.42})\ O_5\ (OH)_4$	0.38	0.34	1.12
9.6	781 + 50 + 125 = 956 548 − 35 + 125 = 638	478 213 265	100	80	5.1	82	70	$(Si_{3.36}\ Al_{0.64})\ (Al_{0.65}\ Zn_{1.63}\ Mg_{0.62})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.31}$	0.55	0.38	1.43
9.8	797 + 62 + 131 = 990 539 − 41 + 131 = 629	495 210 285	100	60	7.5	42	82	$(Si_{3.35}\ Al_{0.65})\ (Al_{0.71}\ Zn_{1.63}\ Mg_{0.51})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.35}$	0.60	0.41	1.48
9.10	678 + 95 + 126 = 899 627 − 57 + 126 = 696	449 232 217	94	70	4.6	90	115	$(Si_{3.02}\ Al_{0.98})\ (Al_{0.54}\ Zn_{1.80}\ Mg_{0.66})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.49}$ $(Si_{1.46}\ Al_{0.54})\ O_5\ (OH)_4$	0.55	0.51	1.08
9.11	680 + 94 + 142 = 916 652 − 57 + 142 = 737	458 246 212	86	60	5.5	75	114	$(Si_{2.98}\ Al_{1.02})\ (Al_{0.58}\ Zn_{1.43}\ Mg_{0.99})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.46}$ $(Si_{1.42}\ Al_{0.58})\ O_5\ (OH)_4$	0.58	0.56	1.04
9.12	366 + 28 + 307 = 701 692 − 24 + 307 = 975	350 325 25	8	5	9.8	3	48	$(Si_{1.93}\ Al_{2.07})\ (Al_{0.95}\ Zn_{1.34}\ Mg_{0.71})\ O_{10}\ (OH)_2 \cdot M^+_{0.15}$ $(Si_{1.05}\ Al_{0.95})\ O_5\ (OH)_4$	0.93	1.76	0.53

TABLEAU 5

Composition minéralogique et formules structurales des produits formés à pH 6.

	4a + 2b 3a + 3b	2a + b a + b a	Calcul % Saponite	Rayons X % Saponite	Perte de poids au dessus de 350° % eau	 % Saponite	Capacité d'échange de cations	Formules structurales (Saponite) (Berthièrine)	Rapports Al/Zn	 Al/Si	 Si/Zn
8.0	903 + 28 − 14 = 914 741 − 24 − 14 = 703	458 234 224	96	100	4.8	87	48	$(Si_4)\ (Zn_{1.60}\ Mg_{1.30})\ O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.22}$	0	0	1.22
8.1	880 + 50 + 26 = 956 689 − 35 + 26 = 680	478 227 251	100	100	6.2	63	70	$(Si_{3.72}\ Al_{0.28})\ (Al_{0.15}\ Zn_{1.49}\ Mg_{1.28})\ O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.29}$	0.15	0.12	1.28
8.2	868 + 91 + 52 = 1011 620 − 55 + 52 = 617	505 206 299	100	100	4.2	97	111	$(Si_{3.61}\ Al_{0.39})\ (Al_{0.41}\ Zn_{1.35}\ Mg_{1.04})\ O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.47}$	0.31	0.22	1.40
8.3	850 + 94 + 58 = 1002 617 − 57 + 58 = 618	501 206 295	100	100	5.0	84	114	$(Si_{3.55}\ Al_{0.45})\ (Al_{0.43}\ Zn_{1.43}\ Mg_{1.03})\ O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.50}$	0.34	0.25	1.38
8.4	717 + 54 + 99 = 870 637 − 37 + 99 = 699	435 233 202	87	80	5.5	75	74	$(Si_{3.31}\ Al_{0.69})$ $(Al_{0.42}\ Zn_{2.01}\ Mg_{0.57})$ $O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.32}$ $(Si_{1.58}\ Al_{0.42})$ $O_5\ (OH)_4$	0.39	0.35	1.13
8.5	753 + 46 + 129 = 928 627 − 33 + 129 = 723	464 241 223	92	40	7.8	37	66	$(Si_{3.25}\ Al_{0.75})$ $(Al_{0.54}\ Zn_{1.44}\ Mg_{1.02})$ $O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.27}$ $(Si_{1.46}\ Al_{0.54})$ $O_5\ (OH)_4$	0.48	0.40	1.20
8.6	858 + 60 + 124 = 1042 563 − 40 + 124 = 647	521 216 305	100	80	5.2	80	80	$(Si_{3.44}\ Al_{0.56})\ (Al_{0.71}\ Zn_{1.06}\ Mg_{1.03})\ O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.32}$	0.55	0.36	1.53
8.8	807 + 63 + 153 = 1023 514 − 41 + 153 = 626	511 209 302	100	80	6.6	57	83	$(Si_{3.32}\ Al_{0.68})\ (Al_{0.83}\ Zn_{1.28}\ Mg_{0.69})\ O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.35}$	0.72	0.46	1.57
8.10	593 + 93 + 160 = 846 661 − 56 + 160 = 765	423 255 168	66	10	7.5	41	113	$(Si_{2.82}\ Al_{1.18})$ $(Al_{0.63}\ Zn_{1.57}\ Mg_{0.80})$ $O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.44}$ $(Si_{1.37}\ Al_{0.63})$ $O_5\ (OH)_4$	0.62	0.69	0.90

TABLEAU 6. — *Composition minéralogique et formules structurales des produits formés à pH 7.*

	4a + 2b 3a + 3b	2a + b a + b a	Calcul % Saponite	Rayons X % Saponite	Perte de poids au dessus de 350° % eau	 % Saponite	Capacité d'échange de cations	Formules structurales (Saponite) (Berthiérine)	Rapports Al/Zn	 Al/Si	 Si/Zn
7-0	843 + 38 - 19 = 862 698 - 29 - 19 = 650	431 217 214	99	100	4.9	84	58	(Si_4) $(Z_{2.15}\ M_{0.72})$ $O_{10}\ (OH)_2\ .\ M^+_{0.26}$	0	0	1.21
7-1	866 + 49 - 1 = 914 673 - 34 - 1 = 638	457 213 244	100	100	4.2	97	69	$(Si_{3.85}\ Al_{0.15})\ .\ (Al_{0.05}\ Zn_{2.05}\ Mg_{0.86})\ O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.31}$	0.07	0.05	1.29
7-2	750 + 68 + 31 = 849 646 - 44 + 31 = 633	425 211 214	100	95	5.5	75	88	$(Si_{3.53}\ Al_{0.47})\ (Al_{0.14}\ Zn_{2.62}\ Mg_{0.24})\ O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.42}$	0.20	0.17	1.17
7-3	687 + 84 + 91 = 862 635 - 52 + 91 = 674	431 225 206	91	70	6.4	60	104	$(Si_{3.19}\ Al_{0.81})$ $(Al_{0.40}\ Zn_{2.23}\ Mg_{0.37})$ $O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.46}$ $(Si_{1.60}\ Al_{0.40})$ $O_5\ (OH)_4$	0.42	0.39	1.08
7-4	361 + 32 + 215 = 608 710 - 26 + 215 = 899	304 300 4	1	0	8.3	28	53	$(Si_{1.21}\ Al_{0.79})\ (Al_{0.75}\ Zn_{2.13}\ Mg_{0.04})\ O_5\ (OH)_4\ M^+_{0.17}$	0.68	1.29	0.51
7-5	425 + 11 + 200 = 636 680 - 15 + 200 = 865	318 288 30	10	0	8.8	20	31	$(Si_{2.93}\ Al_{1.07})$ $(Al_{0.70}\ Zn_{2.24}\ Mg_{0.06})$ $O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.11}$ $(Si_{1.30}\ Al_{0.70})$ $O_5\ (OH)_4$	0.61	0.97	0.64
7-6	510 + 28 + 329 = 867 500 - 24 + 329 = 805	433 268 165	61	0	10.2	0	48	$(Si_{2.60}\ Al_{1.40})$ $(Al_{1.23}\ Zn_{1.39}\ Mg_{0.38})$ $O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.18}$ $(Si_{0.77}\ Al_{1.23})$ $O_5\ (OH)_4$	1.37	1.35	1.02
7-8	626 + 42 + 205 = 873 601 - 31 + 205 = 775	436 258 178	69	20	7.2	47	62	$(Si_{2.96}\ Al_{1.04})$ $(Al_{0.80}\ Zn_{1.53}\ Mg_{0.67})$ $O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.24}$ $(Si_{1.20}\ Al_{0.80})$ $O_5\ (OH)_4$	0.75	0.72	1.14
7-10	445 + 36 + 248 = 729 626 - 28 + 248 = 846	364 282 82	29	0	9.4	10	56	$(Si_{2.68}\ Al_{1.32})$ $(Al_{0.88}\ Zn_{1.97}\ Mg_{0.15})$ $O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.20}$ $(Si_{1.12}\ Al_{0.88})$ $O_5\ (OH)_4$	0.85	1.20	0.71
7-12	336 + 4 + 333 = 673 640 - 12 + 333 = 961	336 320 16	5	0	10.4	0	24	$(Si_{2.71}\ Al_{1.29})$ $(Al_{1.04}\ Zn_{1.57}\ Mg_{0.39})$ $O_{10}\ (OH)_2\ M^+_{0.07}$ $(Si_{0.96}\ Al_{1.04})$ $O_5\ (OH)_4$	1.05	1.99	0.52

Par conséquent, dans les synthèses de silicates, on peut dire que la silice provient en grande partie de la paroi en verre du ballon, ou que cette paroi joue le rôle d'un catalyseur dans le phénomène.

Un des rôles du chlorure de sodium serait de faciliter cette mobilisation de la silice en assurant sa dépolymérisation (G. Okamoto, T. Okura, K. Goto, 1957). Cette action serait plus intense sur la silice de la paroi de verre qui possède une certaine structure que sur celle apportée par la solution de silicate de soude.

Il n'est donc pas nécessaire de faire écouler du silicate de soude dans le ballon pour obtenir la montmorillonite, la calamine ou la willémite. Mais en son absence, il y a plus de difficulté à préparer la montmorillonite. La solution d'acétate de zinc doit s'écouler plus lentement puisque l'effet protecteur du silicate de soude ne s'exerce plus sur la précipitation du zinc. Si l'on opère en l'absence de chlorure de sodium, la solution est pauvre en silice et on ne peut plus obtenir que la calamine ou la willémite.

Chapitre V

ÉTUDE DES PRODUITS FORMÉS

Les produits obtenus au cours de ces synthèses ont été étudiés par les diverses techniques décrites précédemment : rayons X, études thermiques, analyse chimique et mesure de la capacité d'échange de cations.

D'autre part, une méthode de calcul a été proposée. Elle permet, à partir des données de l'analyse chimique, de déterminer la composition minéralogique des produits formés et de calculer leurs formules structurales. L'interprétation des données expérimentales, faite en utilisant les résultats de ce calcul, sera considérée sous deux aspects différents.

Tout d'abord, nous envisagerons l'évolution du produit en fonction de l'apport d'alumine dans le milieu de synthèse. Sur des graphiques, nous porterons en abscisses le rapport Al/Zn des solutions arrivant dans le ballon (Numéros des graphiques en chiffres romains).

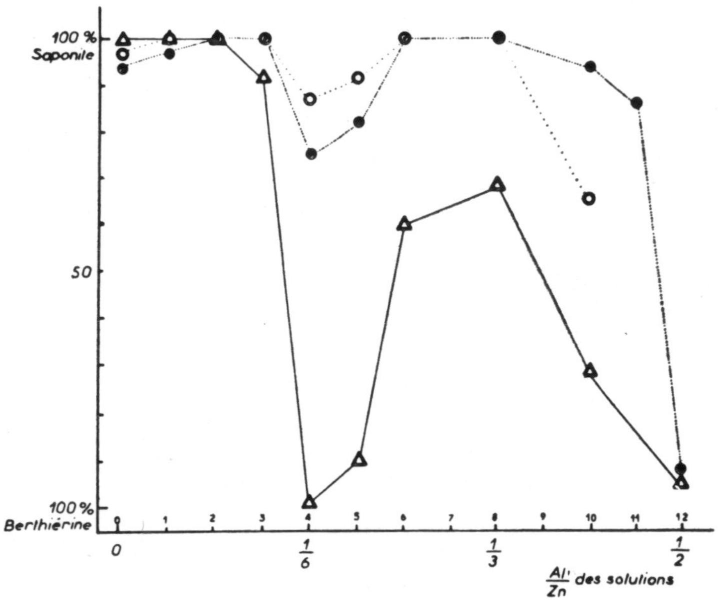
Puis, les résultats obtenus à l'aide des divers moyens d'investigation seront regroupés en fonction de la composition de la couche octaédrique. Nous prendrons alors comme variable le nombre d'ions Al entrant dans la constitution de cette couche (Numéros des graphiques en chiffres arabes).

1. — COMPOSITION MINÉRALOGIQUE CALCULÉE

La variation de la composition minéralogique calculée à partir des données de l'analyse chimique est représentée sur le graphique I. Les teneurs en montmorillonite sont portées en ordonnées.

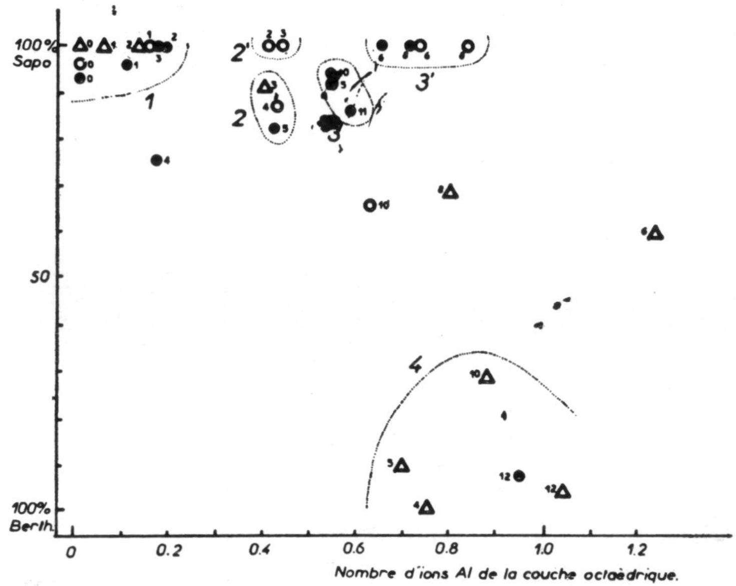
Composition minéralogique calculée

Graphique I



● - Synthèses effectuées à pH 9.
○ - — — pH 8.
△ - — — pH 7

Graphique 1



1 - Saponites normales et stévensites.
2 - Saponites alumineuses.
2' - Saponites alumineuses à couche octaédrique incomplète.
3 - Saponites vermiculitiques
3' - Saponites hyperalumineuses à couche octaédrique incomplète.
4 - Berthiérines.

Pour les trois valeurs du pH auxquelles ont été effectuées les synthèses les courbes ont une allure très voisine.

Il existe deux zones dans lesquelles la proportion de montmorillonite passe par un maximum. Le premier maximum correspond toujours à 100 p. 100 de montmorillonite. Le deuxième maximum n'est égal à 100 que pour les essais effectués à pH 8 et à pH 9. A pH 7 la montmorillonite se forme plus difficilement lorsqu'une grande quantité d'alumine arrive dans le milieu de synthèse, et le calcul met toujours en évidence un mélange de montmorillonite et de berthiérine.

Entre ces deux zones correspondant à des apports en alumine qui représentent des conditions optimales de formation des montmorillonites, il existe une région intermédiaire dans laquelle apparaît la berthiérine. Si la proportion de berthiérine ne dépasse pas 20 p. 100 du mélange aux pH élevés, à pH 7 ce silicate peut se former seul ou n'être mélangé qu'à une très faible quantité de montmorillonite.

Au-delà du deuxième maximum, pour des apports en alumine importants, la phyllite à 7 Å du type berthiérine apparaît de nouveau à tous les pH. Elle devient même le constituant dominant, à plus de 90 p. 100 quelle que soit la valeur du pH choisi pour effectuer la synthèse.

La boehmite se forme ensuite à pH 7. L'apport d'alumine devient tel que sa combinaison avec la silice et le zinc n'est plus possible.

Enfin pour les essais effectués sans alumine, le calcul fait apparaître une certaine proportion de phyllite à 7 Å qui serait alors une antigorite. La montmorillonite dans ce cas est une stévensite.

Utilisons maintenant notre deuxième mode de représentation, c'est-à-dire exprimons les résultats en fonction du nombre d'ions Al entrant dans la couche octaédrique. On constate un certain groupement des points représentatifs dans des zones privilégiées (Graphique 1).

Il existe trois zones nettement individualisées.

L'une d'elles, celle des saponites normales (1), groupe des minéraux dont la couche octaédrique contient moins de 0,20 ion Al par demi-maille. Lorsque le calcul fait apparaître un peu de berthiérine, celle-ci est très proche de l'antigorite.

De même les berthiérines typiques se rassemblent dans une zone (4) correspondant à 0,70 ion Al au minimum par demi-maille en couche octaédrique. Par convention, la couche tétraédrique contient un nombre égal d'ions Al. Ces berthiérines, pures ou mélangées à des proportions de saponite pouvant atteindre 30 p. 100 du mélange, se forment à pH 7.

C'est dans cette zone des berthiérines que se placent également les produits argileux ultimes obtenus à tous les pH et qui doivent être considérés comme des amésites. Il s'agit en effet de phyllites à 7 Å dont la

couche octaédrique et la couche tétraédrique contiennent chacune approximativement un ion Al par demi-maille.

Entre ces deux zones, il en existe une troisième qui groupe des minéraux phylliteux dont la couche octaédrique contient plus de 0,40 ion Al par demi-maille. Il s'agit :

— soit de saponites alumineuses mélangées à de petites quantités de berthiérine, moins de 20 p. 100 (2). Le nombre d'ions Al en couche octaédrique est compris entre 0,40 et 0,45 ;

— soit de saponites hyperalumineuses mélangées à des quantités notables de berthiérine, jusqu'à 35 p. 100 (3). Le nombre d'ions Al de la couche octaédrique est supérieur à 0,50. Les berthiérines sont donc normales. Mais les saponites qui contiennent alors plus d'un ion Al en position tétraédrique ont une constitution cristallochimique qui les apparente aux vermiculites. Pour faciliter la terminologie, nous les appellerons « vermiculitiques » ;

— soit de saponites alumineuses ou hyperalumineuses dont la couche octaédrique est incomplète (2') (3'). Dans ce dernier cas, le calcul fait apparaître une teneur négative en berthiérine. Il y a alors parfois davantage d'alumine dans la couche octaédrique que dans la couche tétraédrique et la capacité d'échange de cations, qui peut néanmoins être assez forte, paraît due aux lacunes du feuillet d'hydroxyde.

Il est curieux de constater une lacune très nette pour la zone correspondant à des minéraux dont la couche octaédrique renfermerait de 0,20 à 0,40 ion Al par demi-maille. En effet, tandis que la densité des points représentatifs des substances formées est très forte entre 0,15 et 0,20 ion Al du côté des saponites vraies aussi bien qu'entre 0,40 et 0,45 ion Al du côté des saponites alumineuses, aucun point ne se place sur le graphique 1 entre 0,20 et 0,40 ion Al.

Il y a de même une lacune entre la zone des berthiérines et celle des saponites hyperalumineuses. Lorsque les deux minéraux apparaissent en mélange, l'un d'eux est nettement plus abondant que l'autre. Ce qui signifie que les mélanges correspondent à des conditions instables et que l'on n'obtient pas une variation progressive de leur composition. L'un des deux constituants est toujours dominant.

Enfin, si l'on considère la répartition des points figuratifs dans ces diverses zones, on constate que :

— les produits formés à pH 9 se répartissent surtout parmi les saponites vraies ;

— les produits formés à pH 8 sont surtout constitués par des saponites alumineuses ou hyperalumineuses, à couche octaédrique incomplète pour la plupart ;

— les produits formés à pH 7 ont leur couche octaédrique complète et se groupent dans la zone des berthiérines, en mélange ou non avec des saponites hyperalumineuses vermiculitiques.

Autrement dit :

— à pH 9, l'alumine ne manifeste pas une tendance très forte à se fixer et elle se place préférentiellement en position tétraédrique. D'où la formation de saponites normales ;

— à pH 8, la fixation d'alumine est plus forte et les saponites sont alumineuses. L'excès de charge qui est créé par une forte proportion d'aluminium en position octaédrique est alors souvent compensé par un déficit en ions bivalents. D'où la fréquence des saponites à couche octaédrique incomplète ;

— à pH 7, la fixation d'alumine, très forte, conduit à la formation des berthiérines.

Ces résultats dus à la seule interprétation par le calcul des données de l'analyse chimique, vont être comparés à ceux obtenus par les autres méthodes expérimentales. Sur les graphiques correspondants, les points représentatifs se groupent toujours dans des zones plus ou moins distinctes suivant les cas.

2. — RAYONS X

Quoique l'évaluation de la composition minéralogique au moyen des diagrammes de rayons X suivant les normes que nous avons indiquées soit assez arbitraire, on retrouve néanmoins sur le graphique 2 les deux maximum des montmorillonites séparés par le minimum correspondant à l'apparition des berthiérines. Les quantités de berthiérine ainsi évaluées sont plus grandes que ne l'indique le calcul, surtout à pH 7 et à pH 8, pour les forts apports en alumine.

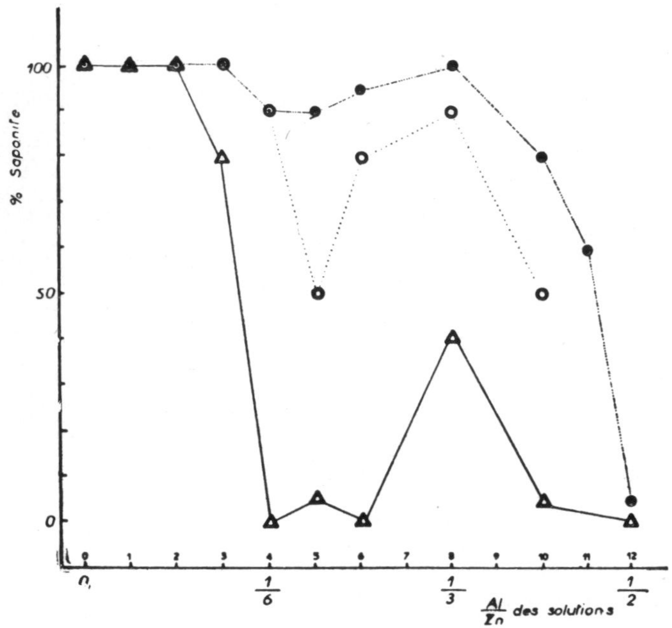
Le graphique 2, qui donne la composition minéralogique en fonction de la constitution de la couche octaédrique, sépare bien les saponites vraies, les saponites alumineuses, les saponites hyperalumineuses à couche octaédrique incomplète, les berthiérines et les mélanges de berthiérine et de saponite vermiculitique.

3. — PERTE DE POIDS AU-DESSUS DE 350°

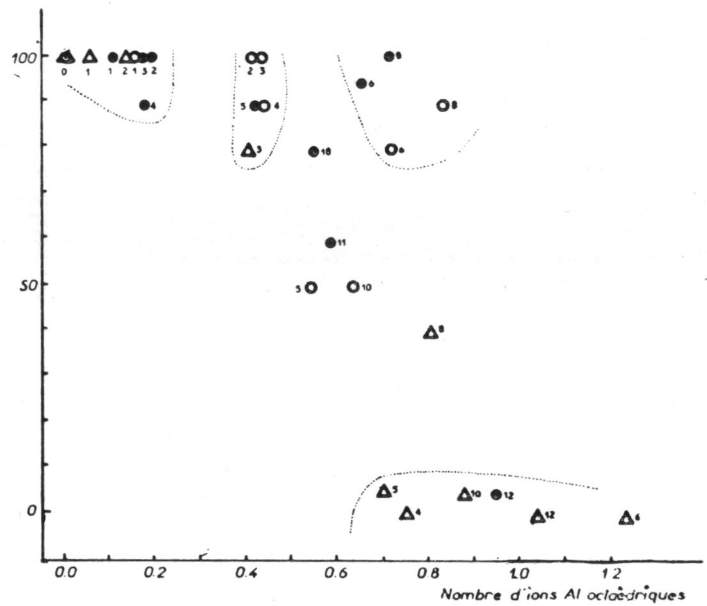
Les résultats précédents sont moins nets lorsque l'on considère la valeur de la perte de poids au cours du chauffage entre 350° et 800°. A pH 8 en particulier, les variations en fonction de l'apport d'alumine sont un peu désordonnées (graphique III). Seules les saponites vraies et les saponites alumineuses sont nettement isolées (graphique 3), quoique la perte d'eau enregistrée au-dessus de 350° soit assez variable d'un échantillon à l'autre : elle s'étage en effet entre 4 et 6,4 p. 100 pour des

Graphique II

Rayons X



Graphique 2



produits qui apparaissent aux rayons X comme des montmorillonites pures.

Ce fait n'infirme pas les résultats précédents. En effet, la valeur de la perte de poids due à la destruction de la couche octaédrique peut être modifiée par les variations de la composition chimique de cette couche d'hydroxyde. Et il est vraisemblable que les saponites hyperalumineuses

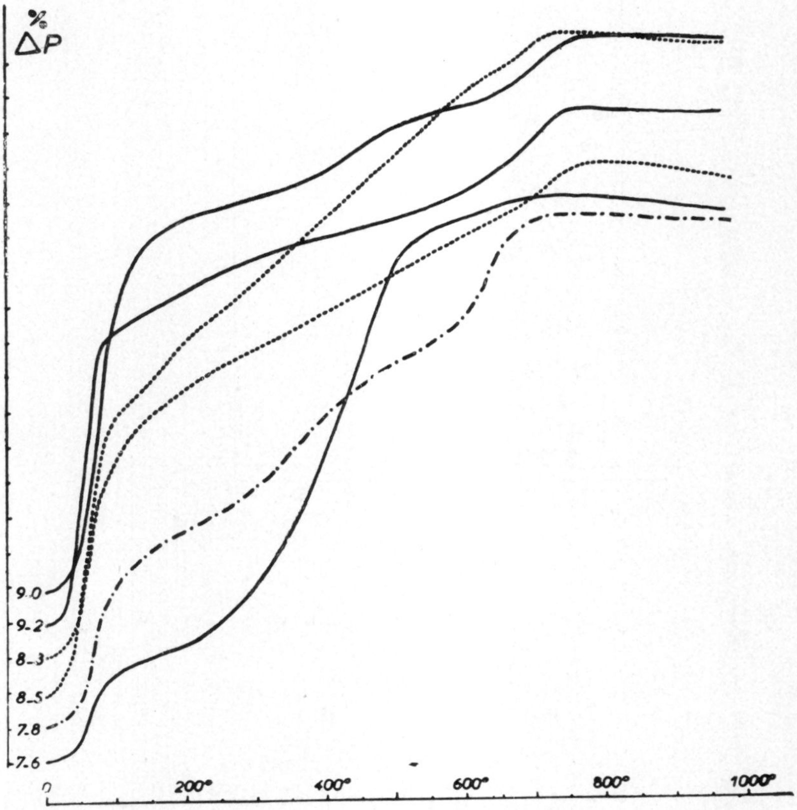


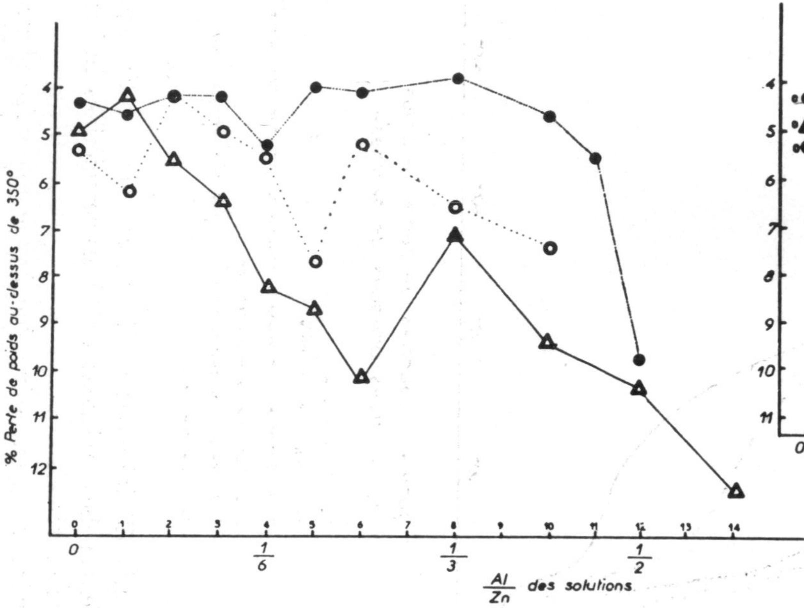
Figure 4 - Courbes de perte de poids de quelques produits de synthèse.

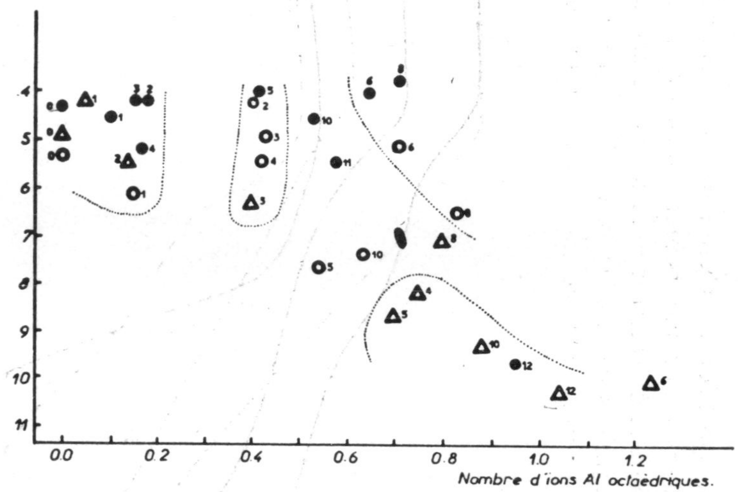
9-0 : Stévensite.
9-2 : Saponite normale
8-3 : Saponite alumineuse à couche octaedrique incomplète.
8-5 : Saponite hyperalumineuse
7-8 : Mélange de berthiérine et de saponite vermiculitique
7-6 : Berthiérine.

ont une cristallinité assez médiocre, ce qui pourrait expliquer que certaines d'entre elles se situent à côté des berthiérines du fait que leur perte en eau est exagérée.

L'hydratation excessive due à une mauvaise structure cristalline

Graphique III — Perte de poids au-dessus de 350° — Graphique 3





se justifie si l'on considère non plus la seule valeur absolue de la perte de poids, mais l'allure de la courbe de déshydratation (fig.4). Ces produits ont été obtenus à pH 8. Leur destruction est progressive : la courbe de thermobalance est pratiquement rectiligne et ascendante depuis 250° ou 300° jusqu'à 700°. A cette dernière température, on n'observe pas le départ net caractéristique des saponites.

4. — CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE CATIONS

La capacité d'échange de cations donne une courbe à deux maximum très nets (graphique IV).

Faible chez les stévensites, la capacité d'échange croît d'abord en fonction de l'apport d'alumine. Elle passe par un maximum de l'ordre de 110 milliéquivalents pour 100 g d'argile pour les produits formés à pH 7 ou pH 8. Le maximum enregistré pour les saponites préparées à pH 9 est seulement de 75 milliéquivalents.

Une diminution très sensible de la capacité d'échange traduit l'apparition des berthiérines ou, d'une façon plus générale, la modifiation structurale qui se produit à partir du moment où le rapport Al/Zn des solutions atteint 0,25. La couche octaédrique présente alors un excès de charge : on obtient les saponites alumineuses ou hyperalumineuses à pH 8 et pH 9, les berthiérines à pH 7.

Quand le rapport Al/Zn des solutions croît encore la capacité d'échange augmente de nouveau. On constate alors qu'aux pH élevés il se forme des saponites hyperalumineuses à couche octaédrique incomplète. La somme des ions en position octaédrique est de l'ordre de 2,80 à 2,90. Il en résulte une capacité d'échange élevée malgré l'excès de charge afférent à l'aluminium octaédrique.

Dans les mêmes conditions, à pH 7, la berthiérine continue à se former : les capacités d'échange sont relativement faibles. Cependant la capacité d'échange augmente, car la berthiérine est en mélange avec des saponites hyperalumineuses vermiculitiques.

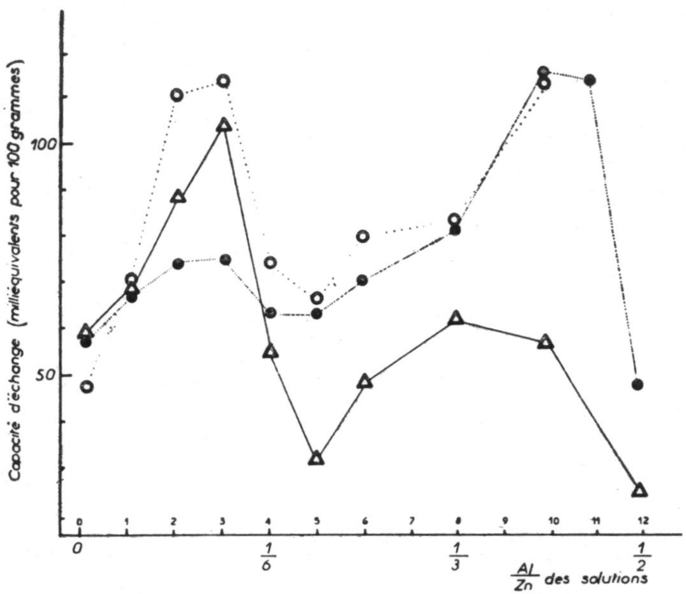
D'après les variations de la capacité d'échange il semble donc que les produits préparés à pH 7 varient d'une manière différente de ceux obtenus aux pH plus élevés. En particulier, un même minéral ou un même mélange se formerait avec des quantités d'alumine plus faibles à pH 7. De toute façon, les types vermiculitiques apparaissent aux pH élevés pour des teneurs en alumine plus fortes. Leur présence correspond au deuxième maximum de la capacité d'échange de cations.

Puis lorsque le rapport Al/Zn des solutions atteint 0,75, l'amésite se forme à tous les pH et la capacité d'échange décroît brusquement.

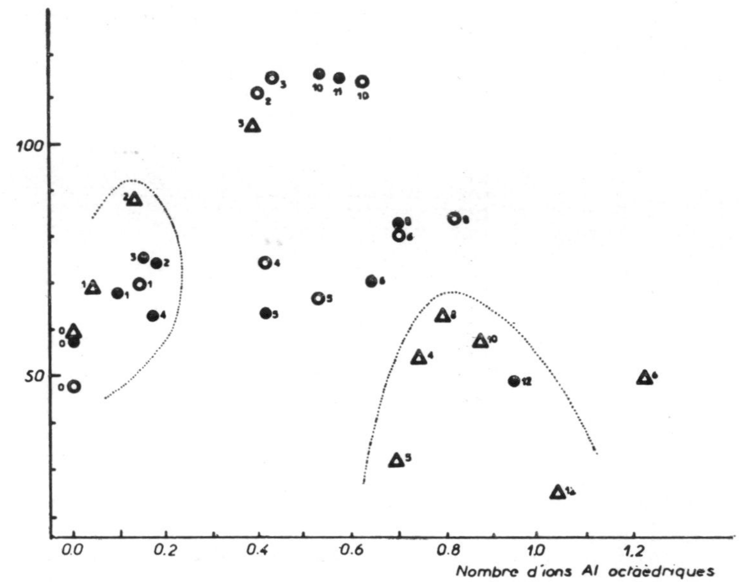
La valeur de la capacité d'échange est le reflet, non seulement de la

Capacité d'échange de cations

Graphique IV



Graphique 4



composition minéralogique des produits, mais aussi de leur constitution cristallochimique. Il n'y a donc pas un accord étroit entre les diverses séries de données. Néanmoins la convergence des résultats est suffisante pour justifier l'ensemble des conclusions.

Nous allons examiner maintenant les variations des rapports des différents ions.

5. — VARIATION DES TENEURS EN ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS

Les variations des rapports Al/Zn et Al/Si des produits de synthèse, exprimées en fonction de la teneur en alumine des solutions utilisées (graphiques V et VI), présentent un palier très net, à pH 9, pour les faibles apports en alumine. Celui-ci correspond à la formation des saponites normales.

A pH 8, ce palier n'existe pratiquement pas. Il est seulement amorcé et cela pour des valeurs deux fois plus fortes des rapports considérés. Il correspond à la formation de saponites alumineuses à couche octaédrique incomplète.

A pH 7, le palier n'est même pas ébauché. On n'observe pas un « équilibre saponite » en fonction de l'apport d'alumine : on monte rapidement vers l' « équilibre berthiérine ».

Pour des apports plus importants d'alumine, on constate, à pH 9, l'existence d'un deuxième palier. Il correspond à la formation des saponites hyperalumineuses, à couche octaédrique complète ou non.

A pH 8, ce deuxième palier n'est pas mieux marqué que le premier. On peut considérer que le passage des saponites alumineuses à couche octaédrique incomplète aux saponites hyperalumineuses vermiculitiques se fait progressivement par l'intermédiaire des saponites alumineuses et des saponites hyperalumineuses à couche octaédrique incomplète.

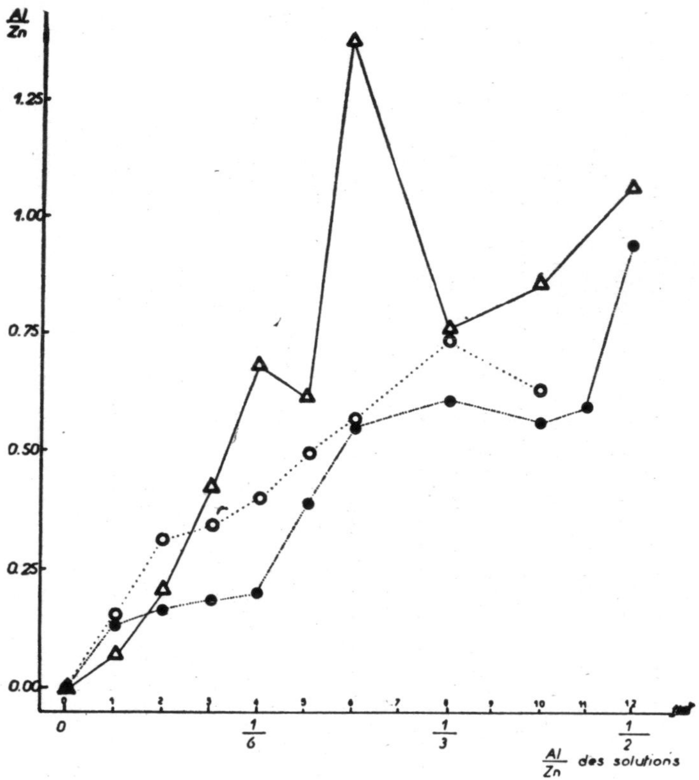
Enfin, à pH 7, l' « équilibre berthiérine » qui donne des produits hyperalumineux (berthiérines ou mélanges de berthiérine et de saponite vermiculitique), débute pour des apports en alumine relativement faibles correspondant à ceux qui, aux pH élevés, donnaient seulement des saponites (à pH 9) ou des saponites alumineuses (à pH 8).

Sur les graphiques, la répartition des points de cet « équilibre berthiérine » peut paraître assez désordonnée. Mais il ne faut pas oublier que maintenir à 7 le pH de solutions contenant des ions Zn n'est pas chose facile, surtout quand l'opération doit durer trois semaines. Et pour cette valeur du pH, des variations même très faibles entraînent une modification déjà notable.

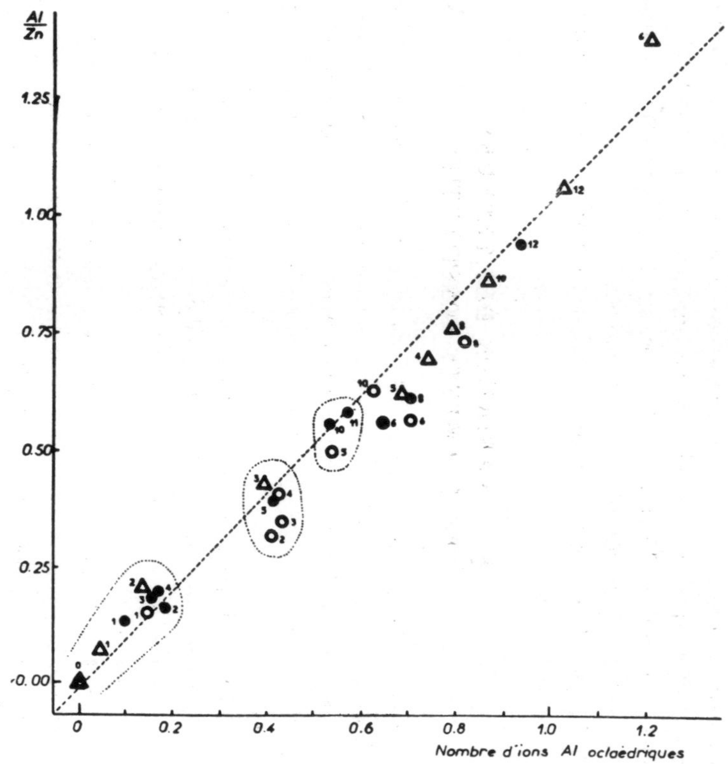
Si l'on exprime les valeurs des rapports considérés en fonction du

Nombre d'ions Al / Nombre d'ions Zn

Graphique V



Graphique 5



nombre d'ions Al contenus dans la couche octaédrique, les points représentatifs de Al/Zn se groupent le long d'une droite de pente égale à 1 (graphique 5). Il n'y a plus de distinction franche entre les saponites hyperalumineuses et les berthiérines. Ces dernières se placent seulement à la suite des premières vers les valeurs les plus grandes du rapport Al/Zn et de la quantité d'aluminium octaédrique.

Par contre la distinction des berthiérines et des saponites hyperalumineuses est très nette avec le rapport Al/Si (graphique 6). Il fallait d'ailleurs s'y attendre, puisque c'est la forte teneur en silice qui constitue la différence essentielle entre les phyllites à trois couches et à deux couches. Et le graphique VI a déjà montré le caractère particulier des produits formés à pH 7 qui sont déficitaires en silice.

Les valeurs de ce rapport Al/Si, exprimées en fonction de la quantité d'ions Al octaédriques, séparent d'ailleurs dans tous les groupes les saponites à couche octaédrique complète des saponites à couche octaédrique incomplète.

Cette séparation est encore plus nette avec le rapport Si/Zn (Graphique 7). Les courbes du graphique VII, dans lequel les valeurs de ce rapport sont considérées en fonction de la quantité d'alumine fournie à la synthèse, montrent les deux maximum de la composition minéralogique.

Ces graphiques 6 et 7, en séparant les produits à couche octaédrique complète des produits à couche octaédrique incomplète, montrent que deux possibilités se présentent pour la réalisation des synthèses, et que la formation des produits à couche octaédrique incomplète n'est pas due à un excès d'alumine, puisqu'on passe alternativement des uns aux autres lorsque la proportion d'alumine croît dans le milieu de synthèse.

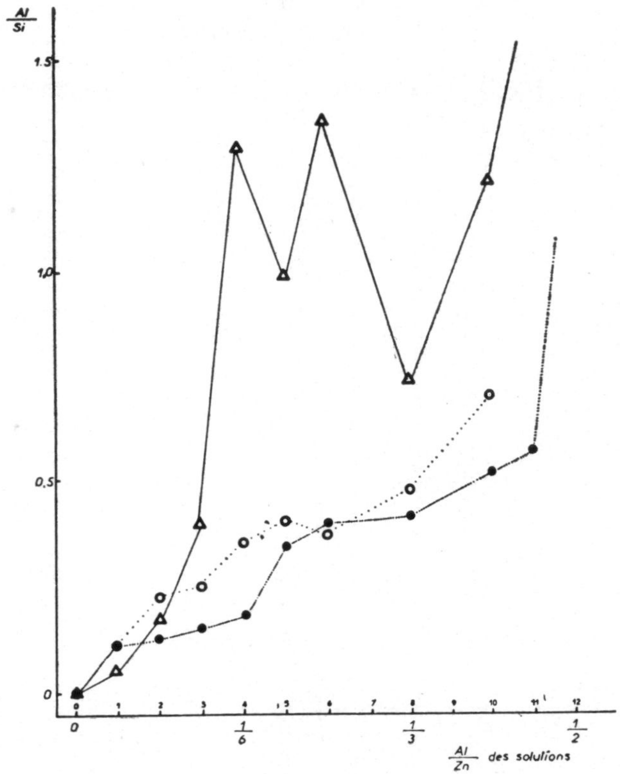
Il faut donc admettre que la fixation de l'alumine n'est pas progressive, c'est-à-dire qu'elle n'est pas fonction de la quantité apportée dans le milieu. Elle varie par paliers successifs, plus ou moins nets suivant le pH auquel on opère. Et c'est la raison pour laquelle les points représentatifs des produits se groupent par zones en fonction du nombre d'ions Al en position octaédrique.

On peut définir deux paliers de fixation de l'alumine.

Le premier palier, qui n'existe pas à pH 7, correspond à la formation des saponites vraies. L'alumine se fixe en position tétraédrique. Ce mode de fixation est particulièrement important à pH 9.

A partir d'une certaine teneur de la solution en alumine, celle-ci précipite avec les ions bivalents et participe à la constitution de la couche octaédrique. En même temps, la substitution en couche tétraèdrique augmente, ce qui rétablit l'équilibre des charges : on a des saponites alumineuses. Et une faible proportion de berthiérine apparaît.

Graphique VI



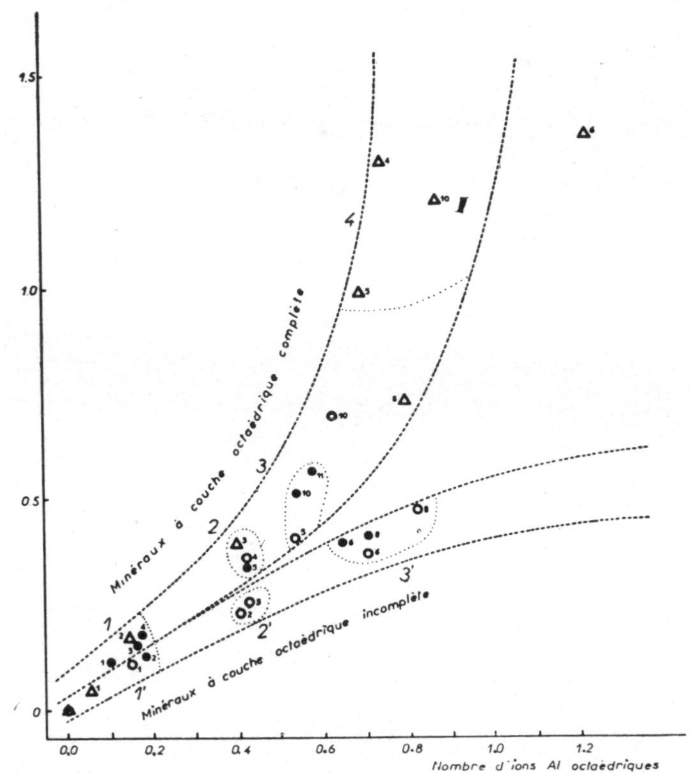
● Synthèses effectuées à pH 9

○ " " pH 8

△ " " pH 7

$\frac{\text{Nombre d'ions Al}}{\text{Nombre d'ions Si}}$

Graphique 6



0 Stévensites

1 Saponites normales

2 " alumineuses

3 " vermiculitiques

4 Berthiérines

1' Saponites normales à couche octaèdrique incomplète

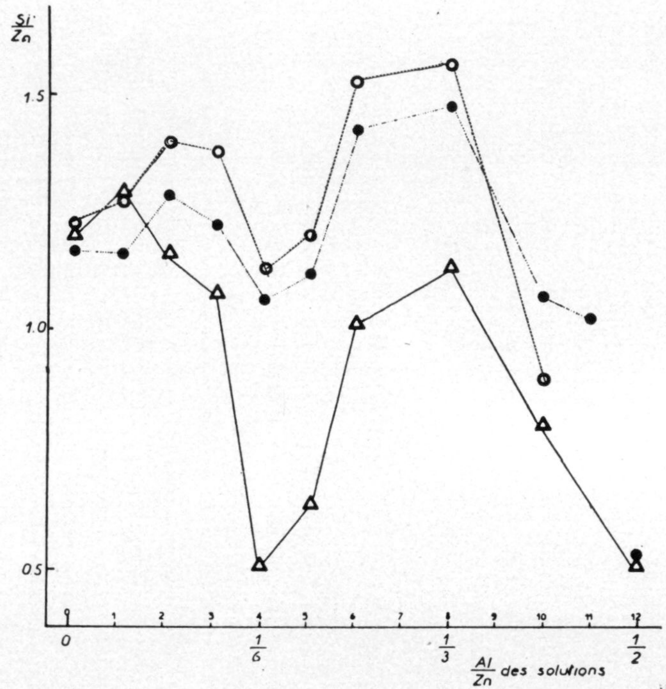
2' " alumineuses " "

3' " hyperalumineuses " "

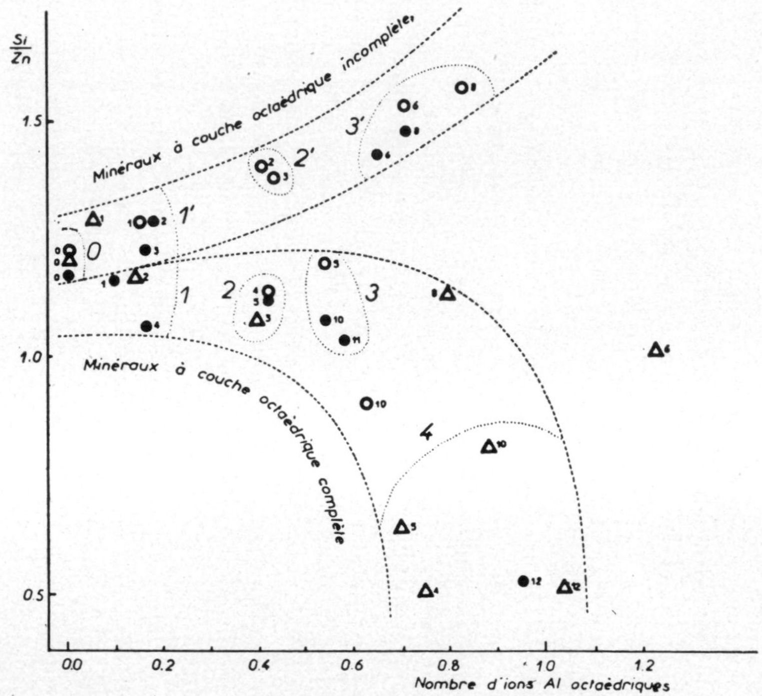
Graphique VII

$\frac{\text{Nombre d'ions Si}}{\text{Nombre d'ions Zn}}$

Graphique 7



- ● Synthèses effectuées à pH 9
- ○ " " pH 8
- △ " " pH 7



0 Stévensites

1. Saponites normales

2. " alumineuses

3. " vermiculitiques

4. Berthiérine

1' Saponites normales à couche octaédrique incomplète.

2' " alumineuses " "

3' " hyperalumineuses " "

Mais ce mélange ne constitue qu'une étape transitoire vers le deuxième palier qui correspond à la formation des produits hyperalumineux : saponites à couche octaédrique incomplète à pH 8 et pH 9, puis saponites vermiculitiques en mélange avec la berthiérine à tous les pH.

Enfin, l'équilibre est de nouveau rompu, et l'amésite représente une nouvelle étape transitoire vers des produits non phylliteux.

Si maintenant l'on considère la distribution des rapports Al/Si et Si/Zn en fonction de l'aluminium octaédrique (Graphique 6 et 7) on constate que les produits à couche octaédrique complète se répartissent entre deux courbes et se groupent par zones : les saponites vraies, les mélanges de saponite et de berthiérine, et les berthiérines. Ces courbes admettent des asymptotes verticales. La droite Al oct = 1 est asymptote de la médiane de ces deux courbes. Il ne paraît donc pas possible de dépasser un remplacement correspondant à celui des amésites en faisant croître la proportion d'alumine dans le milieu de synthèse. L'amésite représente le terme ultime des substitutions Al-Si possibles dans les produits phylliteux.

Par contre, du côté des produits à couche octaédrique incomplète, il n'y a pratiquement pas de limite, puisque la valeur asymptotique du rapport Al/Si serait parallèle à l'axe des Al octaédriques. Néanmoins, il ne paraît pas possible de faire croître la proportion d'alumine en position octaédrique au-delà de 1. La discontinuité qui sépare les produits trioctaédriques des produits dioctaédriques ne peut être franchie. Lorsqu'on augmente la teneur en alumine des solutions, ce sont les berthiérines, les amésites qui se forment, c'est-à-dire des produits à couche octaédrique complète. Puis, quand il y a trop d'alumine dans le milieu, il n'y a plus formation de silicates. On obtient de la boehmite à pH 7 et des produits colloïdaux aux pH élevés.

RÉSUMÉ

Pour étudier les conditions de formation des phyllites zincifères à basse température, nous avons utilisé la *méthode expérimentale*. Les résultats obtenus sont les suivants.

1. — *Il est possible de préparer les phyllites zincifères à basse température et sous la pression atmosphérique*. Ce résultat s'ajoute à ceux des recherches antérieures qui ont montré que la méthode est applicable au magnésium, au fer ferreux, au fer ferrique, au nickel et au cobalt.

2. — *La concentration du milieu en zinc est un facteur déterminant.* Pour que la formation des phyllites soit possible il est indispensable que la dilution soit grande. Dans le cas contraire, on obtient des silicates non

phylliteux : la calamine et la willémite. Ces silicates sont, du point de vue des conditions de génèse, les équivalents zincifères des antigorites nickélifères et magnésiennes. L'existence des antigorites purement zincifères est donc douteuse.

3. — *La présence d'électrolytes joue*, suivant la nature de leurs anions ou de leurs cations, *le rôle de catalyseurs ou d'inhibiteurs de la réaction.* Ces électrolytes favorisent la dépolymérisation de la silice. Par la force ionique qu'ils confèrent au milieu de synthèse ils agissent sur les conditions d'hydrolyse de l'ion Zn. Ils ont donc une action déterminante sur son indice de coordination au moment de la précipitation de l'hydroxyde, ce qui explique leur influence sur la formation des minéraux phylliteux.

4. — *Ce n'est pas le pH seul qui détermine le type de phyllite à deux ou à trois couches, mais la combinaison des deux facteurs : pH et concentration en alumine.* Ainsi les phyllites à deux couches se forment beaucoup plus facilement à pH 7 qu'aux pH plus élevés où leur apparition est déterminée exclusivement par l'action de la concentration en alumine.

Par ailleurs, la différence de comportement entre l'aluminium et les autres cations se trouve être confirmée, puisque certaines teneurs en alumine, correspondant d'ailleurs aux valeurs limites trouvées pour les produits naturels, apparaissent dans les essais comme une constitution extrême au-delà de laquelle les synthèses ne sont plus possibles. Cet ensemble de faits expérimentaux vient confirmer la distinction entre les types di-et trioctaédriques, puisqu'en aucun cas nous n'avons vu se constituer de formes intermédiaires entre ces deux classes de minéraux : l'alumine apportée en mélange avec les cations bivalents se répartit entre les couches tétraédrique et octaédrique pour équilibrer les charges, sans qu'il se produise de déficit important en couche octaédrique.

Enfin ces expériences de synthèse permettent de préciser un aspect du comportement du zinc dans les sols. Le zinc est en effet un oligélément indispensable au développement des plantes. Or, dans les terrains qui manifestent une carence en zinc, il arrive que la végétation ne réagisse pas à un apport de cet élément. Il y aurait donc un phénomène de « blocage », tout comme pour le potassium.

ELGABALY (1950) a étudié l'adsorption du zinc avec différents minéraux phylliteux. Il a constaté qu'une fraction du zinc adsorbé n'est pas échangeable avec l'acétate d'ammonium et doit être considérée comme fixée par le minéral. Dans les minéraux alumineux, le zinc se placerait dans les places libres de la couche octaédrique : d'où une diminution de la capacité d'échange de cations et une augmentation de la capacité d'échange d'anions. Dans les minéraux magnésiens, le zinc se substitue au magnésium dans la couche octaédrique, et les propriétés d'adsorption du miné-

ral ne sont pas affectées. Dans les deux cas, le zinc ainsi fixé dans la couche octaédrique ne redevient soluble que difficilement.

Or nos expériences de synthèse prouvent que le zinc manifeste une forte tendance à entrer dans une structure cristalline. Dans une certaine mesure, les synthèses de silicates sont plus faciles à réaliser avec le zinc qu'avec les autres ions. Ceci est d'ailleurs en accord avec les données de la physico-chimie et de la géochimie. L'explication fournie par ELGABALY semble donc très plausible : dans les sols le zinc peut se trouver bloqué dans la couche octaédrique des minéraux argileux.

Mais la facilité avec laquelle le zinc peut précipiter sous forme d'oxyde et s'unir à la silice pour donner des silicates insolubles oblige à envisager la possibilité de blocage sous forme de willémite ou de calamine. L'hydrolyse des solutions zinciques donne en effet de l'oxyde et nous avons vu que dans ce cas, s'il y a de la silice, il se forme de la willémite.

Ce bref résumé confirme que le zinc a, du point de vue de la génèse des minéraux argileux, le comportement que l'on pouvait prévoir théoriquement d'après les propriétés de ce cation. On précise ainsi un aspect de la géochimie des argiles dont la connaissance est indispensable pour interpréter plus exactement les phénomènes de la pédogénèse.

SUMMARY

The silicates of zinc. A study of products of synthesis.

An experimental study of the conditions of formation of zinciferous phyllites produced the following results :

1) It is possible to prepare zinciferous phyllites at low temperature and under pressure. This result conforms with that of earlier investigations which showed the method to be applicable to magnesium, ferrous and ferric iron, nickel and cobalt.

2) Zinc concentration in the medium is a determining factor. The formation of phyllites requires a high dilution, because otherwise non phyllitic silicates such as calamine and willemite are produced. These silicates, as far as conditions of their genesis is concerned, are the zinciferous equivalents of nickeloferous and magnesian antigorites. The existence of purely zinciferous antigorites in thus doubtful.

3) The presence of electrolytes, according to the nature of their anions or cations, plays the role of catalyst or inhibitor in the reaction. These electrolytes promote the depolymerisation of silicon ; their ionic force in the medium of synthesis acts on the conditions of hydrolysis of Zn, and they exert a determining action on the magnitude of co-ordination at the moment of hydroxide precipitation, explaining their effect in the formation of phyllitic minerals.

4) A combination of pH and of aluminium concentration rather than pH alone determines the type of phyllite of two or three layers ; phyllites of two

layers are more easily formed at pH 7 than at greater alkalinity where their appearance is governed exclusively by the concentration of aluminium.

On the other hand, the difference between the behaviour of aluminium and other cations is confirmed, since certain aluminium concentrations, corresponding to limit values found for the natural products, appeared in the experiments to be excessive, above which synthesis is not possible. These experimental results confirm the distinction between trioctahedral types, since in no case did intermediate forms between these two classes of minerals form : aluminium supplied in mixture with divalent cations was distributed between the tetrahedral and octahedral layers for balancing the charges without any notable deficit in the octahedral layer.

Finally, these experiments of synthesis throw a light on the behaviour of zinc in soil. Zinc is a trace element indispensable for plant growth, yet in zinc deficient soils it may occur that plants fail to respond to a supply of this element, due to some « blocking » like it happens with potassium.

Elgabaly (1950) studied the adsorption of zinc by different phyllitic minerals and found that a fraction of adsorbed zinc is not exchangeable with ammonium acetate and may be regarded as fixed by the mineral. In aluminous minerals, the zinc occupies the free spaces of the octrahedral layer, resulting in a decrease of cation-exchange capacity and increase in anion-exchange capacity. In magnesium minerals, the zinc is exchanged for magnesium in the octahedral layer, and the adsorption properties of the mineral remain unaffected. In both cases, the zinc fixed in the octahedral layer does not easily become soluble again.

Our experiments of synthesis show that zinc possesses a strong tendency to enter into a crystalline structure. To a certain measure, synthesis of silicates is more easily performed with zinc than with other ions, which agrees with physico-chemical and geochemical findings. Elgabaly's explanation thus seems plausible : zinc in soil may be blocked in the octahedral layer of clay minerals.

The ease by which zinc can precipitate as an oxide and become united with silicon to produce insoluble silicates suggests a possible blocking in the form of willemite or calamine. Hydrolysis of zinc solutions actually produces an oxide, producing willemite in presence of silicon.

Results confirm that, in the genesis of clay minerals, zinc behaves in a way theoretically expected from the properties of this cation, throwing some light on the geochemistry of clays which furnishes indispensable data for a more precise interpretation of soil-forming processes.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Zinksilikate. — Studium von Syntheseprodukten.

Zum Studium der Bildungsbedingungen von zinkhaltigen Phyllosilikaten bei niedriger Temperatur, wurde die experimentelle Methode benützt. Folgende Resultate wurden erzielt :

1) Die Herstellung zinkhaltiger Phyllosilikate ist möglich bei niedriger Temperatur und normalem Luftdruck. Dieses Ergebnis ist früheren Forschungen beizufügen welche die Anwendbarkeit dieser Methode für Elemente wie Magnesium, Eisen-II, Eisen-III, Nickel und Kobalt erwiesen.

2) Als bestimmender Faktor gilt die Konzentration des Mediums an Zink. Um eine Phyllosilikatbildung zu ermöglichen ist eine hohe Verdünnung unbedingt notwendig. Andernfalls erhält man keine Phyllosilikate sondern Galmei und Willemit. Diese zinkhaltigen Silikate entsprechen, betreffs ihrer Entstehungsbedingungen, den nickel-und magnesiahaltigen Antigoriten. Das Bestehen reiner zinkhaltiger Antigoriten ist daher zweifelhaft.

3) Die Gegenwart von Elektrolyten spielt, je nach Art der Anionen oder Kationen, die Rolle eines Reaktionskatalysators oder-Inhibitors. Diese Elektrolyten begünstigen die Depolymerisation der Kieselsaüre. Durch die ionische Kraft welche sie dem Synthesemedium verleihen, wirken sie auf die Hydrolysebedingungen des Zink-Ions. Deshalb fällt ihnen, im Augenblick der Hydroxydfällung eine bestimmende Wirkung auf dessen Koordinationszahl zu, was ihren Einfluss auf die Phyllosilikatbildung erklärt.

4) Nicht allein der pH ist bestimmend für die Erhaltung von zwei oder dreischichtigen Phyllotypen, sondern die Kombination zweier Faktoren : pH und Konzentration an Tonerde. So bilden sich zweischichtige Phyllosilikate viel leichter bei einem pH-Wert von 7 als bei höheren pH-Werten, wo deren Entstehung alleinig durch die Tonerdekonzentration bestimmt wird.

Das unterschiedliche Verhalten zwischen Aluminium und anderen Kationen wird andrerseits dadurch bestätigt, dass in den Versuchen, gewisse Tonerdegehalte, als extreme Zusammensetzungen erscheinen für welche jegliche Synthesen unmöglich werden ; diese Werte entsprechen den Grenzwerten welche für natürliche Produkte gefunden wurden. Dieses experimentelle Gesamtbild wird dadurch bestätigt, dass in keinem Falle Zwischenglieder zwischen den di- und trioktaedrischen Typen entstehen : die beigebrachte Tonerde in Mischung mit divalenten Kationen verteilt sich zwischen den tetraedrischen und oktaedrischen Schichten um die Ladungen auszugleichen ohne dass hierbei ein ansehnlicher Defizit in der oktaedrischen Schicht sich bildet.

Diese Syntheseexperimente erlauben, ein gewisses Verhalten des Zinkes im Boden zu präzisieren. Der Zink ist in der Tat, ein für die Pflanzenentwicklung notwendiges Spurenelement. Nun aber, kommt es vor, dass die Vegetation von Gelände welche einen Zinkmangel aufweien, auf eine Zinkgabe nicht reagiert. Genau so wie für das Kalium, befände man sich hier vor einer « Blockierungserscheinung ».

Elgabaly (1950) studierte die Zinkadsorption mit verschiedenen Phyllomineralien. Er stellte fest, dass ein Teil des adsorbierten Zinkes mit Ammoniumazetat nicht austauschbar ist, und daher als an das Mineral gebunden, anzusehen sei. Bei den aluminiumhaltigen Mineralien, dürfte sich der Zink in die Lücken oktaedrischen Schichten einfügen : hierbei ergibt sich eine Erniedrigung der Kationenaustauschkapazität und eine Erhöhung der Anionenaustauschkapazität. Bei magnesiahaltigen Mineralien werden die Adsorptionseigenschaften des Minerals hierdurch nicht betroffen, weil in der oktaedrischen Schicht eine Substitution des Magnesiums durch Zink stattfindet. In beiden Fällen, ist das in der oktaedrischen Schicht festgelegte Zink sehr schwer löslich.

Nun aber beweisen unsere Syntheseexperimente dass das Zink für kristallinische Struckturen eine starke Eindringungstendenz zeigt. In einem gewissen Masse, ist es leichter Silikatsynthesen mit Zink als mit anderen Ionen zu bewerkstelligen. Dies steht ausserdem im Einklang mit aus der physikalischen Chemie sowie der Geochemie gegebenen Tatsachen. Die durch

Elgabaly gegebene Erklärung scheint daher sehr plausibel : in den Böden kann der Zink in der oktaedischen Schicht der Tonmineralien blockiert sein.

Die Leichtigkeit jedoch, mit welcher der Zink als Oxyd ausfällt und mit Kieselsäure in Verbindungen tritt um unlösliche Silikate zu bilden, zwingt uns, die Möglichkeit einer Blockierung in Form von Willemit oder Galmei in Betracht zu ziehen. Die Hydrolyse zinkhaltiger Lösungen führt in der Tat zu einer Oxydbildung, und wir sahen, dass in diesem Falle, in Gegenwart von Kieselsäure, es zur Bildung von Willemit kommt.

Dieze kurze Zusammenfassung bestätigt, dass vom Standpunktt der Tonmineraliengenesis aus, das Zink ein Verhalten zu Tage treten lässt, welches man theoretischerweise aus den Eigenschaften dieses Kations voraussehen konnte. Hiermit präzisiert man ein Aspekt der Geochemie der Tone, deren Kenntnis sich als notwendig erweist, um pedogenesische Erscheinungen richtiger zu deuten.

Силикаты цинка. — Изучение продуктов синтеза.

ЕСКЕВЭН. Версальская почвенная лаборатория.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Для изучения условий образования при низкой температуре содержащих цинк филлитов, мы пользовались опытным методом. Получены следующие результаты :

1. Получение при низкой температуре и в условиях атмосферного давления содержащих цинк филлитов возможно. Этот результат дополняет результаты предыдущих изысканий, показавших что этот метод может быть применек к магнию, двухвалентному и трехвалентному железу, к никелю и к кобальту.

2. Концентрация цинка является определяющим фактором. Чтобы образование филлитов было возможным, необходимо чтобы разбавление было сильным. В противном случае получаются силикаты не филлитные : каламин и виллемит. Эти силикаты, с точки зрения условий образования, являются эквивалсктами цинка содержащих никель и магний антигоритов. Таким образом, существование антигоритов исключительно цинковых является сомнительным.

3. Присутствие электролитов, в зависимости от природы их анионов и катионов, играет роль катализаторов или вредителей (= inhibiteurs). Эти электролиты способствуют деполимеризации кремниевой кислоты. Ионной силой, которую они сообщают среде где происходит синтез, они действуют на условия гидролиза ионов цинка. Следовательно, они имеют определяющее дейстьие на его « indice de coordination » в момент осаждения гидроокисла, что и объясняет их влияние на образование филлитных минералов.

4. Не один только pH определяет тип двух — или трехслойного филлита, но сочетание двух факторов : pH и концентрация алюминия. Так например, двухслойные филлиты образуются много легче при pH 7, чем при pH более высоких, когда их появление определяется исключительно действием концентрации в алюминии.

Так же, разница в поведении между алюминием и другими катионами утверждена, т. к. некоторые концентрации алюминия, соответствующие впрочем предельным что найдены в естественных условиях, выявляются в опытах как крайний предел, и за ним синтезы невозможны. Эта совокупность экспериментальных фактов подтверждает различие между типами двух — и трехоктаэдрическими, т. к. мы никогда не видали образования форм промежуточных между этими двумя классами минералов : гидроокисел алюминия внесенный в смеси с двухвалентными катионами распределяется между слоями тетраэдрическим и октаэдрическим, чтобы уравновесить зарядки, не производя значительного недостатка в октаэдрическом слое.

Наконец, эти синтетические опыты позволяют лучше понимать один вид поведения цинка в почве. В самом деле, цинк есть один из элементов необходимый для развития растений. В то же время случается, что в почвах нуждаюшихся в цинке растения не реагируют на внесение этого элемента. Имеется, повидимому, явление блокажа, как это известно насчет калия.

Эльгабали (1950) изучал адсорбцию цинка, с различными филлитными минералами. Он установил, что часть адсорбированного цинка не вытесняется уксуснокислым аммонием и что она должна рассматриваться как зафиксированная (= блокированная) минералом. В содержащих алюминий минералах, цинк повидимому занимает свободные места октаэдрического слоя : откуда уменьшение обменной способности катионов и увеличение обменной способности анионов. В минералах содержащих магний, цинк замещает магний в октаэдрическом слое, и адсорбционные свойства минерала не изменены. В обоих случаях, цинк закрепленный таким образом в октаэдрическом слое становится с трудом снова растворимым.

Наши синтетические опыты доказывают, что цинк обнаруживает значительную тенденцию войти в кристаллическую структуру. В некоторой степени, синтезы силикатов легче осуществляются с цинком, чем с другими ионами. Это, впрочем, согласуется с физикохимическими и геохимическими данными. Данное Элъгабали объясненые кажется, таким образом, очень вероятным : в почвах, цинк может находиться блокированным в октаэдрическом слое глинистых минералов.

Но легкость, с которой цинк может выпадать в форме окисла и присоединяться к SiO^2 и производить нерастворимые силикаты, заставляет предвидеть возможность блокажа в форме виллемита или каламина. В самом деле, гидролиз цинковых растворов дает окисел, и мы видали, что в этом случае, если имеется SiO^2, образуется виллемит.

Это краткое представление работы нодтверждает что, с точки зрения образования глинистых минералов, цинк имеет поведение, которое можно было предвидеть теоретически согласно свойствам этого катиона. Таким образом лучше понятен один из видов геохимии глин, знание которого необходимо, чтобы более точно истолковывать явления почвообразования.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Caillère (S.), Hénin (S.). — Un problème de nomenclature : les saponites magnésiennes. *Groupe français des Argiles*, **8**, 37, 1956.

(2) Caillère (S.), Hénin (S.), Esquevin (J.). — Recherches sur la synthèse des minéraux argileux. *Bull. Soc. Franc. Minér. Crist.*, **76**, 300, 1953.

(3) CAILLÈRE (S.), HÉNIN (S.), ESQUEVIN (J.). — Étude expérimentale du mécanisme de la formation des antigorites nickélifères. *Bull. Soc. Franc. Minér. Crist.*, **79**, 408, 1956.

(4) CAILLÈRE (S.), HÉNIN (S.), ESQUEVIN (J.). — Synthèse d'argiles cobaltifères. *Clay Mineral Bulletin*, 1957.

(5) CHENG (K. L.), KURTZ (T.), BRAY (R. H.). — *Anal. Chem.*, **24**, 1640, 1952.

(6) COREY (R. B.), WYCKOFF (R. W. G.). — The crystal structure of Zinc hydroxyde. *Zeits. Kristallographie*, **86**, 8, 1933.

(7) ELGABALY (M. M.). — Mechanism of Zinc fixation by colloïdal clays and related minerals. *Soil Scinece*, **69**, 167, 1950.

(8) EMMONS (S. F.). — Geology and Mining Industry of Leadville, Colorado. *U. S. Geol. Survey, Mono.*, **12**, 560, 1886.

(9) EMMONS (S. F.), IRVING (J. D.), LOUGHLIN (G. F.). — Geology and ore deposits of the Leadville mining district, Colorado. *U. S. Geol. Survey*, Prof. Paper, 148, 1927.

(10) ESQUEVIN (J.). — Synthèse de la berthiérine zincifère. *C. R. Acad. Sci.*, **242**, 2967, 1956.

(11) ESQUEVIN (J.). — Synthèse de la calamine et de la willémite à basse température. *C. R. Acad. Sci.*, **243**, 1334, 1956.

(12) ESQUEVIN (J.). — Sur la composition minéralogique des moresnétites et l'existence probable d'une nouvelle phyllite zincifère. *C. R. Acad. Sci.*, **244**, 215, 1957.

(13) FAUST (G. T.). — Thermal analysis and X-Ray studies of Sauconite and of some zinc minerals of the same paragenetic association. *Am. Mineral.*, **36**, 795, 1951.

(14) FEITKNECHT (W.). — Die Struktur des $\varkappa$-Zinkhydroxyds. *Zeits. Kristallographie*, **84**, 173, 1932.

(15) FEITKNECHT (W.). — Uber die alpha-Form der Hydroxyde zweiwertiger Metalle. *Helv. Chim. Acta*, **21**, 766, 1938.

(16) FLASCHKA (H.), ABDINE (H.). — Mikrotitrationen mit Aethylendiamintetraessigsäure. XIII. Eine neue Methode zur Bestimmung von Aluminium. *Mikrochim. Acta*, **1**, 37, 1955.

(17) FLASCHKA (H.), ABDINE (H.). — Zur komplexometrischen Titration von Aluminium und Eisen und der Summe beider. *Zeits. anal. Chem.*, **152**, 77, 1955.

(18) FLEROV (V. N.). — Ralentisseurs de vieillissement des solutions zincosodiques. *Zh. prikladn. Khim., SSSR*, **29**, 1779, 1956.

(19) GOTTFRIED (G.), MARK (H.). — Die Bestimmung der Struktur von Zn $(OH)_2$. *Zeits. Kristallographie*, **65**, 416, 1927.

(20) GOUDRIAAN .— *Rec. Trav. Chim.*, **39**, 505, 1920.

(21) HENDRIKS (S. B.), NELSON (R. A.), ALEXANDER (L. T.). — Hydration Mechanism of the clay mineral montmorillonite saturated with various cations. *Am. Chem. Soc. Jour.*, **62**, 1457, 1940.

(22) HÉNIN (S.), ROBICHET (O.). — Sur les conditions de formation des minéraux argileux par voie expérimentale à basse température. *C. R. Acad. Sci.*, **236**, 517, 1953.

(23) HÉNIN (S.), ROBICHET (O.). — Nouveaux résultats concernant la préparation des minéraux argileux au laboratoire ; synthèse de l'antigorite. *C. R. Acad. Sci.*, **238**, 2554, 1954.

(24) HILDEBRAND, REILLEY. — *Analyt. Chemistry*, **29**, 258, 1957.

(25) INGERSON (Earl), MOREY (G. W.), TUTTLE (O. F.). — The systems K_2O-ZnO-SiO_2, ZnO-Be_2O_3-SiO_2 and Zn_2SiO_4-Zn_2GeO_4. *Am. Jour. Sci.*, **246**, 31, 1948.

(26) ITO (T.), WEST (J.). — The Structure of Hemimorphite $H_2Zn_2SiO_5$. *Zeits. Kristallographie*, **83**, 1, 1932.

(27) KINNUNEN (J.), MERIKANTO (B.). — *The Chimist Analyst*, **41**, 76, 1952.

(28) Körbl (J.), Pribil (R.). — Metallochromic Indicators. *Coll. Czech. Chem. Comm.*, **22**, 1122, 1957.
(29) Kuhn (V.). — Progrès récents dans les dosages complexométriques du calcium et du magnésium dans les laitiers. *Chimie analytique*, **40**, 340, 1958.
(30) Kurilov. — *Zeits. Elektrochem.*, **12**, 213, 1906.
(31) Loughlin (G. F.). — The oxidized Zinc Ores of Leadville, Colorado. *U. S. Geol. Survey, Bull.*, 681, 24, 1918.
(32) Musil (A.), Theis (M.). — Die komplexometrische Bestimmung des Eisens mit Chromazurol S als Indicator. *Z. anal. Chem.*, **144**, 351, 1955.
(33) Okamoto (G.), Okura (T.), Goto (K.). — Properties of silica in water. *Geoch. Cosm. Acta*, **12**, 123, 1957.
(34) Schmied (W.), Stegmüller (L.). — Anwendung von Komplexon III bei analytischen Untersuchungen von keramischen Stoffen. *Berichte der deutschen keramischen Gesellschaft*, **34**, 135, 1957.
(35) Schwarzenbach (G.). — Die komplexometrische Titration. F, Enke Verlag, Stuttgart, 1957.
(36) Schwarzenbach (G.), Biedermann (W.). *Chimia*, **2**, 56, 1948.
(37) Theis (M.). — Die direkte massanalytische Bestimmung des Aluminiums mit Aethylendiamintetraessigsäure (Komplexon III). *Z. anal. Chem.*, **144**, 106, 1955.
(38) Tonani (F.). — Metodo per il dosaggio rapido di alluminio e ferro nelle rocce. *R. C. Soc. mineral. ital.*, **11**, 358, 1955.
(39) Zambonini (F.). — Contributo allo studio dei silicate idrati. *Alti della Real Accad. delle scienze fisische e mathematiche*, 14, ser. 2, n° 1, 1908, 1910.

631. 417. 746. 6

DE QUELQUES CONDITIONS SUSCEPTIBLES DE MODIFIER LES PROPORTIONS DES ACIDES AMINÉS DU SOL

PAR

J. CARLES et **J. DECAU**

Laboratoire de Physiologie végétale, Institut catholique, Toulouse
et Station d'Agronomie et d'Œnologie, Toulouse.

S

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

Les acides aminés du sol.

leur origine ;
leur forme ;
leur disparition.

Analyses effectuées.

sols analysés ;
technique adoptée.

Résultats obtenus.

les acides aminés trouvés ;
l'influence du climat .
autres influences :
la profondeur et l'oxygène ;
le rapport C/N ;
la fumure organique.

Discussion des résultats.

les décarboxylations et l'augmentation de la lysine ;
le rapport fraction acide/fraction basique ;
la résistance aux attaques bactériennes.

Conclusions.

INTRODUCTION

La plus grande partie de l'azote du sol (98 p. cent) s'y trouve sous forme organique. Cet azote organique n'est pas uniquement protéique puisque un tiers seulement, les deux tiers au plus, sont susceptibles de

fournir par hydrolyse des acides aminés. Une plus petite fraction est sous forme d'osamines et le reste fait partie d'hétérocycles divers qui entrent dans la constitution des acides humiques.

Puisque l'azote représente ordinairement 1 à 2 pour mille du sol arable, soit 3 à 6 tonnes par hectare, pour une couche d'une vingtaine de centimètres, on peut estimer qu'un hectare de terre arable renferme 6 à 30 tonnes d'acides aminés.

* * *

Si les formes minérales de l'azote (ammoniaque, nitrites et nitrates), leur formation et leur évolution sont depuis longtemps connues, les formes organiques et en particulier les formes aminées, quoique plus importantes, le sont beaucoup moins.

Cependant, dès 1908, Susuki (34) a pu caractériser dans le sol 7 acides aminés : l'alanine, la valine, la proline, etc... En 1910, Schreiner et Shorey (23) isolaient du sol l'arginine et l'histidine ; en 1913, Shorey isolait aussi la lysine (25).

Pendant plusieurs décades, les acides aminés du sol sont relativement peu étudiés et nous devons attendre la mise au point de nouvelles méthodes précises et rapides d'analyse des mélanges d'acides aminés par chromatographie (Boulanger et Biserte, Moore et Stein notamment) pour que cette étude prenne un nouvel essor.

En 1950, Bremner (2) identifie par chromatographie sur papier, dans les hydrolysats de nombreux sols, 14 acides aminés et observe qu'ils ne varient guère d'un sol à un autre.

Sowden (27) étudie les acides aminés non basiques de trois sols différents et remarque que leurs proportions sont à peu près identiques.

En 1954, Stevenson (31), libérant également les acides aminés du sol par hydrolyse acide, a pu isoler par chromatographie sur colonne, 32 composés réagissant à la ninhydrine dont 20 furent identifiés.

Par la suite, Stevenson (32) identifie 9 autres composés donnant une coloration à la ninhydrine.

Tandis que ces auteurs hydrolysent l'ensemble du sol, d'autres en étudient certaines fractions.

Parker, Sowden et Atkinson (16) ont examiné différentes fractions organiques isolées par peptisation d'un podzol, d'un sol noir et d'un sol de prairie ; Stevenson, Marcks, Varner et Martin (30) ont caractérisé 8 acides aminés dans certaines fractions des colloïdes organiques extraits de l'argile de Brookston.

Bremner (4) comparant suivant la technique de Flaig (12) l'acide humique brun et l'acide humique gris isolés à partir d'un sol noir, Hayashi et Nagai (14) travaillant sur un acide humique « de type A », ont aussi

trouvé qu'une fraction importante de l'azote de ces composés fournit des acides aminés.

Mentionnons encore quelques études sur les osamines. En 1957, STEVENSON (33) examinant un grand nombre de profils, observe que 5 à 11 p. cent de l'azote des couches superficielles, est sous forme de sucres aminés ; cette proportion augmente avec la profondeur jusqu'à atteindre 20 p. cent dans l'horizon d'accumulation de certains podzols. Cette fraction azotée est principalement représentée par la glucosamine et la galactosamine dont le rapport varie dans les podzols de 1,6 à 4,1 suivant la végétation : ce rapport est particulièrement élevé en présence de conifères (29).

En 1954 et 1956, STEVENSON a décelé à côté de la glucosamine et de la galactosamine, la chondrosamine et l'N-acétyl-D-glucosamine (31-32).

Notre étude porte seulement sur la fraction azotée organique susceptible de libérer par hydrolyse des acides aminés. Nous allons essayer de préciser les variations et l'évolution de ces composés et pour cela considérer comment les acides aminés apparaissent dans le sol, sous quelle forme ils s'y trouvent et comment ils disparaissent.

LES ACIDES AMINÉS DU SOL

Leur origine

Les acides aminés sont formés par les organismes vivants, végétaux ou animaux ; ceux du sol proviennent, en pratique, de ce qu'abandonnent ou rejettent ces organismes ou de ce que libère leur décomposition. Une microflore très abondante et très active attaque et métabolise rapidement ces corps aux dépens desquels elle vit.

Les résultats de cette attaque sont très complexes car les protides sont utilisés par les bactéries soit comme aliment plastique, pour construire leur organisme, soit comme aliment énergétique pour l'énergie chimique que ces molécules sont susceptibles de fournir en se minéralisant.

La minéralisation transforme ces protides en ammoniaque, en nitrate ou même en azote gazeux. Une partie de cet azote minéral est définitivement perdue par le sol car il peut se dégager dans l'atmosphère ou être entraîné par les eaux de drainage.

Une grande partie de l'azote demeure sous forme organique parce qu'elle entre dans la constitution des microbes ou bien dans des combinaisons organiques qui peuvent difficilement être attaquées ou minéralisées par eux.

Une source bien moins abondante, mais qui présente tout de même une grande importance du point de vue écologique, est la sécrétion radi-

culaire. La plupart des plantes sécrètent dans le sol où elles germent des substances assez variées. Parmi ces sécrétions, CARRE a identifié quelques acides organiques dont le plus fréquent est l'acide citrique et de nombreux acides aminés. On trouve, à peu près toujours, de l'acide aspartique, de l'asparagine, de l'acide glutamique ; un peu moins régulièrement de la glutamine, de la sérine, de l'alanine, de la valine, de la leucine ; assez fréquemment, la thréonine, la lysine, la phénylalanine, la tyrosine, le glycocolle et le tryptophane.

Ces acides aminés sont trop peu abondants pour qu'on en tienne compte dans un inventaire global, mais leur présence a sans doute une assez grande influence sur la microflore du sol car ils sont très facilement absorbés ; il est possible, en particulier, que la microflore prospère davantage autour des racines de légumineuses parce que les plantes de cette famille ont des sécrétions plus abondantes (9).

Leur forme

Les acides aminés peuvent se trouver dans le sol sous quatre formes : engagés dans des déchets animaux ou végétaux, dans des microorganismes vivant dans le sol, ou bien encore sous forme d'acides aminés libres et sous forme de combinaisons avec les éléments du sol.

Nous laisserons de côté, dans cette étude, les déchets rapidement décomposés mais constamment renouvelés. Ces déchets sont utilisés par les *microorganismes* et l'ensemble de ces microbes, vivants ou morts, constitue une partie essentielle de l'azote du sol. Mais, plus encore que par leur masse, les microorganismes sont importants par leur action : ils transforment tous les protides à tel point que la matière organique du sol ne garde pratiquement aucune trace des déchets à partir desquels elle s'est formée. La microflore du sol est si variée et si active qu'elle impose une certaine homogénéité statistique et tous les sols finissent par se ressembler plus ou moins (28, 36).

Un acide aminé témoigne de la présence et de l'activité des bactéries : l'acide diamino-pimélique, toujours présent dans les hydrolysats de sols ; or, cet acide aminé ne se trouve guère que dans les microorganismes. BREMNER (5) étudiant l'humification in vitro de la paille a vu apparaître et augmenter cet acide aminé au cours de la fermentation.

Les *acides aminés libres* sont peu abondants dans le sol, car ils sont vite absorbés par les bactéries ou bien par les racines, et leur vie moyenne paraît être d'un ou deux jours. On a cru longtemps qu'il était impossible de les mettre en évidence (3, 26), mais des études précises sur une assez grande quantité de terre ont montré qu'on en trouve toujours de 2 à 400 μg par kg de sol (20). Ces acides aminés ne proviendraient pas des racines car ils paraissent moins abondants dans la rhizosphère ; ce sont

l'acide aspartique, l'acide glutamique, la valine, la leucine, l'arginine, la lysine, l'histidine, la cystine, la phénylalanine, l'alanine et le tryptophane. Si l'on ajoute au sol du glucose ou du nitrate de soude, leur quantité augmente jusqu'à décupler. Par ce même traitement, le nombre des composés aminés décelables passe de 25 à 40 (18).

Les acides aminés libres augmentent aussi à la suite de la dessication. Cette augmentation s'expliquerait, soit par l'accumulation des produits de décomposition des microorganismes du sol, soit par le fait que les acides aminés sont moins utilisés par suite de la diminution de l'activité bactérienne résultant de la stérilisation partielle (19).

Les acides aminés fixés posent de nombreux problèmes. Ils contrastent étonnamment avec les acides aminés libres par leur stabilité et leur résistance aux attaques bactériennes qui détruisent si rapidement les autres.

Le premier problème est de savoir s'ils sont fixés isolés ou bien sous forme de peptides et de protéides. Naguère encore, on croyait la forme protéique plus fréquente, mais il semble admis de plus en plus que les acides aminés sont fixés isolément. Une des grandes questions, en effet, est celle de leur protection : les liaisons peptidiques qui unissent entre eux les acides aminés dans les protéines ne paraissent pas susceptibles de résister longtemps aux microorganismes. TINSLEY et ZIN (35) ont tout de même identifié des fragments de ligno-protéines, prouvant que les acides aminés ne sont pas tous isolés.

Les acides aminés, capables d'intervenir comme cations ou comme anions, sont donc susceptibles de se fixer, soit par leur fonction amine, soit par leur groupement carboxyle. Puisque les micro-organismes attaquent surtout la fonction amine, pour satisfaire leur besoin d'azote, on est amené à supposer que cette fonction serait protégée du fait qu'elle assurerait la liaison de l'acide aminé. Cette liaison se ferait, soit sur les dérivés phénoliques de la lignine (6) car FLAIG (11-13) a montré que cette fixation devient possible par l'oxydation en quinones des composés phénoliques, soit sur les groupes acides de l'argile : RODRIGUÈS a montré qu'une partie des acides aminés qui résiste fortement aux autres procédés d'hydrolyse est très vite libérée par l'acide fluorhydrique (21).

Leur disparition

Les acides aminés, caractérisés par la présence simultanée d'une fonction acide et d'une fonction amine, sont détruits par la disparition de l'une ou de l'autre. Cette dégradation peut ne pas se limiter à ces deux fonctions essentielles et atteindre plus ou moins le reste de la molécule qui individualise les acides aminés.

La disparition de la partie acide se fait par décarboxylation. Le car-

boxyle est, pour le carbone, la première étape de l'entrée dans la vie ou la dernière étape avant sa sortie : trois de ses valences sont oxydées. Par l'oxydation de la quatrième, l'acide organique perd son carboxyle qui se transforme en gaz carbonique et l'énergie chimique encore contenue dans cette liaison est libérée. La réaction la plus simple peut s'écrire :

$$R - \underset{}{\overset{NH_2}{\overset{|}{C}H}} - COOH \rightarrow R - CH_2 - NH_2 + CO_2$$

Ainsi l'acide glutamique devient acide γ -amino-butyrique, l'acide aspartique devient β-alanine, la sérine devient éthanolamine, etc...

La perte de la fonction amine peut s'effectuer de multiples façons dont voici les principales :

en présence d'oxygène, la fonction amine et la fonction acide se détachent, remplacées sur le carbone qui les portait, par une fonction acide néoformée

$$R - \overset{NH_2}{\overset{|}{C}H} - COOH + O_2 \rightarrow R - COOH + NH_3 + CO_2$$

en présence d'hydrogène, le résultat est le même, mais il reste sur le radical une fonction méthyle

$$R - \overset{NH_2}{\overset{|}{C}H} - COOH + H_2 \rightarrow R - CH_3 + NH_3 + CO_2$$

en présence d'eau, il reste sur le radical une fonction alcool

$$R - \overset{NH_2}{\overset{|}{C}H} - COOH + H_2O \rightarrow R - CH_2OH + NH_3 + CO_2$$

La dégradation de la molécule restante peut se faire alors que l'acide aminé n'existe plus, à la suite des décarboxylations ou des désaminations, mais elle se fera bien souvent sur la partie non fonctionnelle de l'acide aminé, alors que celui-ci est fixé par sa fonction alcaline ou acide sur un corps résistant. Il arrive que soit ainsi détaché un plus ou moins grand nombre de chaînons carbonés et nous savons déjà que les noyaux aromatiques sont beaucoup plus résistants à ces attaques que les chaînes aliphatiques (15). Il est possible que l'acide acétique, l'éthanol, l'acide butyrique, l'acide lactique, l'acide formique, etc.., qui sont libérés dans le sol par les bactéries (17) le soient à partir des molécules d'acides aminés dont la partie active est fixée sur des composés phénoliques qui la protègent.

ANALYSES EFFECTUÉES

Sols analysés

Une quarantaine de terres, dont nous donnons, dans un tableau général, les principales caractéristiques, ont été analysées. Un vingtaine proviennent de la région toulousaine, des champs d'expérience de la Station Agronomique de l'Office National Industriel de l'Azote (1) ou bien d'autres champs situés sur les alluvions de la Garonne, deux de la région des Landes, quatre de l'École Nationale d'Agriculture de Grignon, trois du Centre National de la Recherche Agronomique à Versailles (pièce des 42 parcelles), quatre enfin de l'Afrique tropicale, soit de la zone à climat sec du Sénégal (Bambey) soit de celle des climats humides de Guinée (Kyndia) ou du Cameroun (Nyombé).

Ces sols présentent des conditions physico-chimiques extrêmement différentes. Certains sont fortement argileux : c'est le cas des parcelles de Grignon, d'autres sont très pauvres en argile comme certaines parcelles de Toulouse ; d'autres en sont pratiquement dépourvus (Landes, Sénégal-Bambey). La plupart sont acides, exception faite des parcelles de la Station Agronomique de l'Office National Industriel de l'Azote et du champ permanent de Grignon. La gamme des pH est très étendue (de 4,7 à 8,5)ainsi que celle des teneurs en carbone (de 2,1 à 60,2 p. mille) et en azote (de 0,21 à 6,97 p. mille). Les rapports C/N varient de 7,5 à 31,0.

Pour certaines terres de Toulouse, de Versailles et de Grignon, des analyses comparatives ont été effectuées sur des sols qui, depuis au moins une vingtaine d'années, étaient sans fumure, ou bien recevaient un apport annuel de fumier ou d'engrais minéraux (NPK).

Pour d'autres, nous avons étudié, au lieu de la seule couche arable, un certain nombre de profils prélevés dans la région toulousaine, sur les terrasses supérieures de la Garonne. Dans le tableau, sont précisés le niveau de chaque prélèvement, en même temps que ses caractéristiques.

Technique adoptée

20 g de sol sont placés dans 60 ml d'acide chlorhydrique 6 N et hydrolysés à l'autoclave à 120° pendant 6 heures.

L'acide chlorhydrique est ensuite éliminé par évaporation sous vide. L'extrait sec est repris par une solution ammoniacale 2 N. Dans ces conditions, le fer mis en solution par l'acide chlorhydrique précipite.

(1) Nous tenons à remercier MM. L. SOUBIÈS et R. GADET et la Station Agronomique de l'Office National Industriel de l'Azote de leur importante contribution à ce travail.

Terres étudiées	Composition physique: Argile	Limon	Sable fin	Sable gros	Calcaire	pH	C ‰	N ‰	C/N
Grignon									
sans fumure depuis 1875	22	15,8	50,2	4,8	5,6	7,9	9,2	1,07	8,6
sans fumure depuis 1902	24,1	13,6	49,1	4,2	7,3	7,8	9,5	1,09	8,7
avec NPK	24,9	14,3	47	5	6,7	7,9	11,2	1,31	8,5
avec fumier	22,4	15,1	48	4,5	7,7	7,8	13,4	1,49	9
Versailles									
sans fumure depuis 1929	16,6	15,9	64	2,6	0	6,6	9,7	1,13	8,6
avec nitrate de chaux	15,7	14,9	63,6	3,1	0	5,5	9,9	1,12	8,8
avec fumier	18,9	15,2	58,3	3,9	0	6,9	21,3	2,3	9,3
champ « Solférino »	0,9	5,7	18,7	66,4	0	6,0	31,7	1,16	27,2
champ « Labouheyre »	0,6	2,7	11,9	78,8	0	6,0	33,9	1,1	31
Toulouse									
Champ Thibaut A									
sans fumure	14,4	37,6	32,8	18,8	0	5,3	11	1,27	8,6
avec NPK	10,4	41,2	33,3	15,1	0	4,9	12,5	1,4	8,9
avec fumier	13,6	43	28,4	15	0	5,7	12	1,4	8,6
Champ Thibaut B									
sans fumure	8	24,8	45,3	21,9	0	5,4	7,3	0,82	8,9
avec NPK	6,4	29,6	43,2	20,8	0	5,5	7,8	0,89	8,8
avec fumier	7,2	26,4	43,6	22,8	0	5,7	8,7	0,90	9,6
Station agronomique									
sans fumure	14	19,2	40,2	23,3	1,8	8,5	13,1	0,92	14,2
avec NPK	14,7	18,5	42,8	22	0,4	8,1	14,4	1,06	13,6
avec fumier artificiel	12,9	19,1	45	19,9	1,3	8,0	18,2	1,38	13,2
avec paille	13,5	19,3	43,8	20,8	1,1	8,0	17,6	1,39	12,7
Afrique									
Sénégal (Bambey)	2,2	2,7	71,3	21,4	0	5,6	2,15	0,21	10,2
Guinée (Kyndia)	32,6	9,6	23,1	24,4	0	5,0	25,7	1,61	16
Cameroun (Nyombé) A	11,7	17,4	20,9	15,6	0	6,6	56,8	5,25	10,8
— — B	8,3	16,8	20,6	15,8	0	6,6	60,2	6,97	8,6
Région toulousaine									
Sol forestier A									
0 à 10 cm	14,4	22,2	50,5	5,1	0	4,8	52,3	2,88	18,2
10-20 cm	14,7	22,5	49,7	6,5	0	4,9	18,8	1,29	14,6
20-30 cm	20,4	21,7	47,0	6,5	0	5,1	14,3	1,31	10,9
30-40 cm	20,6	22,8	46,2	6,2	0	4,8	12,0	0,92	13,0
40-70 cm	25,5	21,8	46,5	1,9	0	4,9	6,8	0,46	14,8
Sol forestier B									
0-20 cm	15,7	23,9	45,2	8,6	0	4,9	26,5	1,52	17,4
20-40 cm	28,1	24,5	35,4	7,0	0	5,0	9,9	0,68	14,6
40-60 cm	24,4	25,5	38,7	7,2	0	5,3	6,1	0,50	12,2
Sol de vigne									
0-20 cm	10,1	19,9	57,4	9,3	0	4,7	6,1	0,63	9,7
20-40 cm	25,1	20,7	44,2	7,2	0	5,5	3,9	0,52	7,5
40-60 cm	27,8	19,3	41,6	6,3	0	5,7	3,6	0,48	7,5
Sol de prairie									
0-5 cm	22,9	21,3	49,4	1,1	0	6,3	21,0	1,80	11,7
5-20 cm	24,2	22,3	46,1	5,6	0	6,4	15,1	1,59	9,5
20-40 cm	29,8	23,7	34,4	7,1	0	6,7	7,7	0,96	8,0

La phase liquide est séparée par centrifugation et recueillie. Le culot de centrifugation, remis en suspension, est lavé deux fois par de l'ammoniaque 2 N. Les différentes solutions ammoniacales sont réunies et évaporées au bain-marie. Le nouvel extrait sec est repris par de l'eau distillée. Une fraction aliquote de cette solution est mise sur une colonne de résine Dowex 50 sous forme H. Après un lavage de la colonne à l'eau distillée qui élimine les composés neutres ou anioniques, les acides aminés sont élués par une solution ammoniacale 2 N. L'éluat est ensuite évaporé à

sec à basse température. Cet extrait sec, renfermant les acides aminés déminéralisés, est repris soit par l'ammoniaque 2 N pour la chromatographie sur papier, soit par un mélange acide acétique-pyridine-eau de pH 3,9 pour l'électrophorèse.

La chromatographie est réalisée sur papier Arches 302 suivant la technique classique de Boulanger et coll. avec comme solvant de première dimension : la phase organique du mélange butanol-acide acétique-eau (40-10-50) et comme deuxième dimension le phénol saturé d'eau.

Après séchage, les chromatogrammes sont révélés par pulvérisation d'une solution de ninhydrine à 0,1 p. 100 dans l'alcool à 95 p. 100 contenant 5 p. 100 de collidine et placés pendant 3 minutes dans une étuve ventilée à 95°C et la quantité d'acides aminés est évaluée d'après la surface et l'intensité des taches.

Pour les mêmes sols, des électrophorèses sont réalisées sur des bandes de papier Arches 304, suivant les conditions décrites par Boulanger, Biserte et coll. (1) pour la séparation des acides aminés.

Sur l'électrophorégramme sont nettement séparés l'acide aspartique, l'acide glutamique, l'acide aminoadipique, le groupe des acides aminés neutres, la β-alanine, l'acide γ-amino-butyrique et le groupe des acides aminés basiques.

Les électrophorégrammes sont révélés par pulvérisation d'une solution de ninhydrine à 1 p. 100 dans l'alcool à 95 p. 100 et passage pendant 30 minutes dans une étuve à 80° C. L'intensité de coloration est appréciée au densitomètre et l'on peut d'après ces données construire des courbes d'absorption telles que celles de la figure I.

RÉSULTATS OBTENUS

Les acides aminés trouvés

Voici d'abord, par ordre moyen d'importance, les acides aminés rencontrés : la leucine, l'alanine, la valine, la lysine, le glycocolle, l'acide aspartique, l'acide glutamique, la thréonine, la sérine, la β-alanine, la proline, l'acide γ-amino-butyrique, la phénylalanine, la tyrosine, l'acide diaminopimélique, l'arginine, l'hydroxyproline, l'ornithine, l'acide amino-adipique et l'histidine.

A ces vingt acides aminés, constamment trouvés dans le sol, il faut ajouter deux corps très voisins qui en dérivent par décarboxylation : l'éthanolamine et l'histamine. Les acides aminés soufrés, méthionine, cystine, aussi bien que le tryptophane, sont vraisemblablement présents dans le sol, mais les méthodes d'extraction que nous avons employées, trop brutales pour eux, les font disparaître.

Tandis que l'animal et la plante édifient des protéines toujours iden-

tiques, aux proportions constantes d'acides aminés, les sols, même de type voisin, fournissent à l'hydrolyse des proportions d'acides aminés plus diverses que les êtres vivants.

Une assez grande similitude existe pourtant entre les acides aminés des sols différents, qui provient de l'ensemble des éléments qui conditionnent ce qu'on pourrait appeler, dans un sens large, la vie du sol. Cependant, certaines conditions physiques ou chimiques modifient plus ou moins ce milieu de culture, entraînant, avec une homogénéité foncière, des variations assez importantes dans l'évolution et les transformations de ses matières organiques.

La première de ces conditions paraît être le climat.

L'influence du climat

Si nous considérons l'ensemble des acides aminés, les trois grands groupes en lesquels les répartit l'électrophorèse, nous constatons que la fraction neutre représente en moyenne la moitié des acides aminés, les fractions acide et basique se partageant l'autre moitié. Cependant, avec les climats tropicaux humides, la fraction basique augmente jusqu'à représenter la moitié du total, tandis que la fraction acide en représente moins du dixième.

Cette différence due au climat apparaît même dans les terres de France. Dans celles des environs de Paris que nous avons analysées, la fraction acide représente environ 30 p. 100 et la fraction basique 15 p. 100 ; celles des environs de Toulouse ont, pour une fraction acide plus variable, 20 p. 100 environ d'acides aminés basiques.

Les courbes de densité optique obtenues à partir des électrophorégrammes des sols étudiés montrent, par rapport au groupe des acides aminés neutres, la diminution de l'acide glutamique et surtout de l'acide aspartique, tandis qu'augmentent la β-alanine et la fraction basique. Ces courbes, établies par densitométrie, ne sont pas strictement quantitatives, étant donnée la diversité de réaction des acides aminés à la ninhydrine : elles donnent cependant une idée assez exacte des variations relatives des différents groupes entre eux (fig. 1).

Le principal acide aminé basique est la lysine, accompagnée par l'arginine, l'ornithine et l'histidine.

L'importance de la lysine dans les hydrolysats de sols paraît très nettement liée aux conditions climatiques : celle-ci est, avec la leucine, l'acide aminé le plus abondant dans les sols tropicaux humides, riches en matières organiques. La lysine se raréfie dans les sols provenant de régions de plus en plus septentrionales (7-8).

Dans les sols de la région toulousaine, elle n'occupe plus que le 4^{e}

rang par ordre d'importance décroissante, après la leucine, la valine et l'alanine.

Dans les sols de la région parisienne, la lysine rétrograde à la sep-

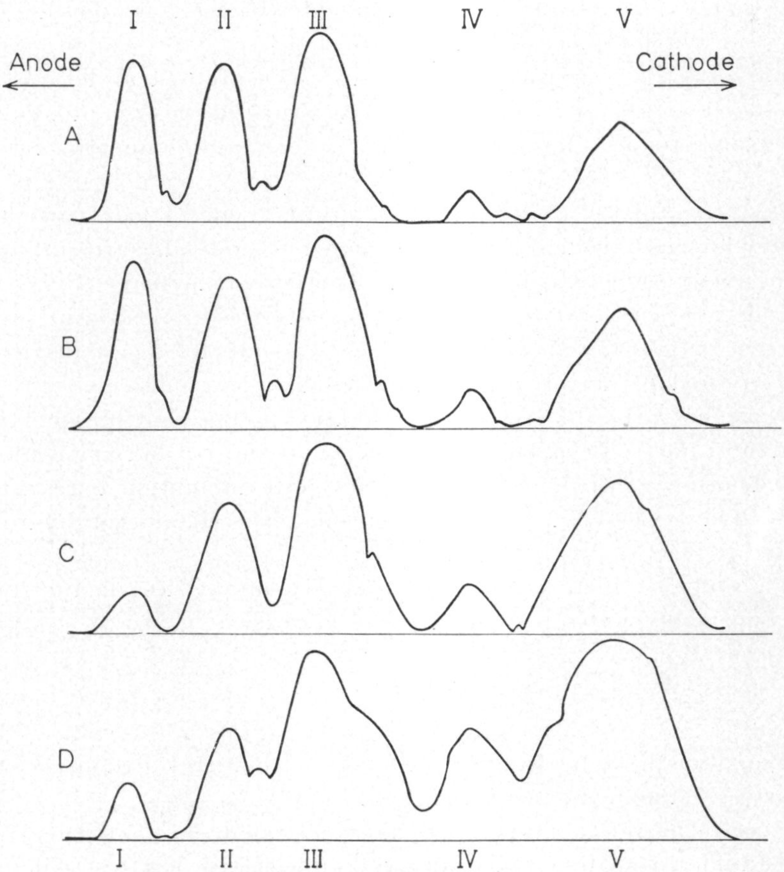


FIG. 1. — Électrophorégrammes de 4 sols : *A*. Versailles, parcelle avec fumier. *B*. Landes, champ «Solférino ». *C*. Toulouse, champ Thibaut B, parcelle avec fumier. *D*. Cameroun, Nyombé *B*.
I. Acide aspartique, II. Acide glutamique, suivi d'acide amino-adipique, III. Acides aminés neutres, IV. β-alanine, V. Acides aminés basiques.
Pour que ces courbes soient comparables, la même valeur a été conventionnellement attribuée an maximum des pics des acides aminés neutres (III).

tième place après la leucine, la valine, l'alanine, le glycocolle, l'acide aspartique et l'acide glutamique.

Dans les sols anglais, étudiés par BREMNER (4), elle n'est plus que la neuvième par ordre d'importance, dépassée encore par la sérine et la thréonine.

Autres influences

La profondeur et l'oxygène.

Des prélèvements ont été faits à différentes profondeurs dans des sols formés sur alluvions anciennes de la Garonne. Ces sols présentent en surface un horizon appauvri en argile, tandis qu'en profondeur des couches plus argileuses reposent le plus souvent sur un horizon d'accumulation concrétionné, formant une couche très dure, imperméable à l'eau.

Les échantillons ont été prélevés au cours d'une période particulièrement pluvieuse pendant laquelle les horizons profonds surmontant la couche imperméable étaient gorgés d'eau et très réducteurs.

Dans ces sols dont les horizons profonds très argileux sont privés d'oxygène, on observe un appauvrissement très rapide en certains acides aminés possédant des groupes hydroxyles dans leur molécule.

Ainsi, en surface, la tyrosine et l'hydroxyproline sont presque aussi abondantes que la phénylalanine et que la proline ; quand augmente la profondeur, par contre, on observe une très nette diminution de ces acides aminés hydroxylés et des rapports tyrosine/phénylalanine et hydroxyproline/proline.

La sérine et la thréonine, bien que présentant des modifications beaucoup moins nettes, varient dans le même sens.

Le rapport C/N.

Dans tous les sols examinés, la teneur en matières organiques et le rapport C/N diminuent avec la profondeur.

A cette baisse du rapport C/N avec la profondeur contribuent une légère diminution des acides aminés aliphatiques neutres à longue chaîne, valine et leucine, une moindre abondance des acides aminés acides, particulièrement de l'acide aspartique et une augmentation des acides aminés décarboxylés, β-alanine, acide γ-amino-butyrique et éthanolamine.

De ce rapport C/N dépendrait, semble-t-il, la proportion des acides aminés acides ou basiques dans la couche arable de certains sols. Pour les sols des Landes, où ces rapports sont très élevés, les acides aminés basiques représentent à peine 10 p. 100 de l'ensemble des acides aminés, tandis qu'abondent les acides aminés acides. Par contre, dans les sols de la région toulousaine relativement voisine, pour lesquels le rapport C/N est beaucoup plus faible, les acides aminés basiques paraîssent nettement plus abondants.

La fumure organique

Un dernier facteur qui paraît influer sur les acides aminés du sol est la richesse de celui-ci en matières organiques, comme on peut l'observer en comparant les sols de parcelles témoins n'ayant reçu aucune fumure depuis de nombreuses années et de parcelles annuellement fertilisées soit par des fumures minérales, soit par des fumiers. Tandis que les fumures minérales ne modifient guère la teneur des sols en matières organiques, ni les proportions des acides aminés, les apports de fumier entraînent l'augmentation des acides aminés aromatiques (tyrosine et phénylalanine) de l'acide diaminopimélique, de la lysine, de la β-alanine et de l'acide γ-amino-butyrique.

DISCUSSION DES RÉSULTATS

1. — Les décarboxylations et l'augmentation de la lysine.

La lysine s'accumule d'autant plus que le milieu est plus favorable aux bactéries, comme le sont en particulier les sols tropicaux humides et riches en matières organiques.

La lysine provient sans doute dans le sol de la décarboxylation de l'acide diamino-pimélique suivant l'équation :

$$COOH - \underset{|}{\overset{NH_2}{CH}} - CH_2 - CH_2 - CH_2 - \overset{NH_2}{CH} - COOH$$

$$\rightarrow NH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - \overset{NH_2}{CH} - COOH + CO_2$$

Ce dernier acide est caractéristique des bactéries ; il devient d'autant plus abondant que les conditions sont meilleures pour elles et parmi ces conditions il convient de noter l'abondance des matières organiques, l'humidité et les températures élevées.

Plus encore que l'acide diamino-pimélique, augmente la lysine qui n'est peut-être, comme nous venons de le signaler, qu'un stade de dégradation de l'acide diamino-pimélique. Il est possible en effet que cet acide ne puisse être métabolisé à l'intérieur des microbes au-delà du stade lysine et soit excrété sous cette forme : ce serait, en définitive, la lysine qui témoignerait de l'activité microbienne tandis que l'acide diaminopimélique témoignerait de la présence et de l'abondance des bactéries.

Bien que la lysine soit activement formée par les microorganismes, son accumulation s'explique sans doute aussi par des phénomènes de protection : il est probable que la lysine se combine avec la silice amorphe libérée généralement en abondance dans les sols tropicaux : différents

auteurs (10) ont observé le rôle de la silice dans la protection, contre la dégradation bactérienne, des protéines vraisemblablement adsorbées par l'intermédiaire des fonctions amines de leurs acides aminés terminaux et de leurs acides aminés basiques.

De plus, l'affinité particulière de ceux-ci pour les terres acides et les silicates est depuis longtemps connue et utilisée pour la séparation des acides aminés basiques à partir de mélanges complexes d'acides aminés (37).

Parmi les acides aminés ou les substances qui pratiquement font partie de leur groupe parce qu'elles sont retenues sur les colonnes échangeuses de cations et révélées par la ninhydrine, nous trouvons, en plus de la lysine, un certain nombre d'autres corps dont l'origine est semblable : l'acide γ-amino-butyrique produit de décarboxylation de l'acide glutamique, la β-alanine provenant de l'acide aspartique, l'éthanolamine de la sérine, l'histamine de l'histidine, etc...

L'acide γ-amino-butyrique dépend de l'acide glutamique et nous voyons ordinairement varier en sens inverse les quantités de ces deux acides : l'augmentation de l'acide γ-amino-butyrique qui se forme aux dépens de l'acide glutamique entraîne sa diminution. Cette corrélation se vérifie dans la plupart des cas, mais cependant, dans les terres tropicales, où l'acide glutamique diminue fortement, cette diminution entraîne par contre coup celle de l'acide γ-amino-butyrique.

La β-alanine abonde aussi dans les sols tropicaux où son augmentation est souvent parallèle à celle du groupe des acides aminés basiques, tandis que l'éthanolamine, généralement présente, est assez peu abondante.

2. — Le rapport fraction acide/fraction basique.

De la plus ou moins grande abondance de l'azote dans le milieu, dépend assez largement, semble-t-il, la proportion des acides aminés, acides et basiques. En milieu pauvre en azote, c'est-à-dire dans les sols à rapport C/N élevé, la fraction basique est peu abondante. Dans ces conditions, nous voyons, au cours des dégradations des matières organiques, les réactions de désamination l'emporter, pour les protéines et les acides aminés, sur les réactions de décarboxylation, favorisant ainsi l'augmentation des acides aminés acides tandis que diminuent les acides aminés basiques. L'ammoniaque libéré se combine sans doute dans ces sols avec les restes de lignine et les acides humiques néoformés qui sont particulièrement aptes à le fixer.

Dans les horizons à C/N bas et pauvres en matières organiques comme les couches inférieures des sols prélevés dans la région de Toulouse, l'augmentation très nette des acides aminés décarboxylés, la diminution des acides aminés acides montrent que les acides aminés, au lieu d'être sur-

tout dégradés par leur fonction amine, peuvent l'être par leur fonction acide.

3. — La résistance aux attaques bactériennes.

Un autre caractère susceptible de faire varier la proportion de certains acides aminés est leur capacité de résistance aux attaques bactériennes. Nous avons dit que ces attaques se produisent sans doute sur la partie non fixée et par conséquent non protégée des acides aminés. D'autre part, HOFFMAN (15) a signalé que les chaînes aliphatiques sont moins résistantes que les chaînes aromatiques : c'est pourquoi les deux acides aminés aromatiques, la phénylalanine et la tyrosine, voient leur importance croître d'autant plus qu'augmente l'activité bactérienne.

Par quels intermédiaires passe la dégradation des acides aminés à chaîne aliphatique? Il est difficile de s'en rendre compte par la seule étude des acides aminés. La dégradation peut se faire par oxydation du carbone terminal qui devient alcool, puis carboxyle, avant de se détacher en CO_2 ; c'est la décarboxylation ordinaire. Il se peut que cette dégradation se fasse par β-oxydation et ceci expliquerait l'origine de l'acide acétique du sol. Il se peut que toute la chaîne constituant le radical soit détachée d'un bloc ou fragment par fragment, et nous arriverions ainsi fatalement au plus simple des acides aminés, le glycocolle dont l'abondance est relativement si grande dans les sols, surtout dans les sols à faible activité bactérienne. Il se peut enfin que, de la fonction amine fixée sur les blocs phénoliques, tout le reste soit détaché. Cette dernière éventualité a pour elle d'assez nombreux arguments : beaucoup d'acides organiques apparaissent dans le sol, qui peuvent provenir d'acides aminés ayant perdu leur amine, l'acide acétique qui proviendrait ainsi du glycocolle, l'acide lactique de la sérine, l'acide propionique de l'alanine, l'acide butyrique des acides amino-butyriques, etc.

D'autre part, il est vraisemblable que l'azote qui se trouve dans le sol sous forme d'une fonction amine provient pour la plus grande partie de l'amine d'un acide aminé. Si, par exemple, comme le suggère FLAIG (13), les acides aminés se fixent sur les corps phénoliques oxydés en quinones, cette liaison amine-phénol est probablement plus résistante aux attaques bactériennes que les autres liaisons qui constituent la molécule de l'acide aminé : de l'amine solidement fixée, tout le reste de la molécule se détacherait en bloc ou progressivement.

CONCLUSIONS

En définitive, bien que les acides aminés puissent, pour un même sol, différer légèrement suivant les conditions locales, leur ensemble présente une assez remarquable homogénéité statistique : la microflore est, en effet, si variée que son action aboutit toujours aux mêmes résultats. Cependant, si la microflore est pratiquement la même, les conditions dans lesquelles elle vit peuvent faire varier certains aspects de son activité et modifier les proportions relatives des acides aminés entre eux : on voit la lysine augmenter en fonction de l'échauffement du climat, les décarboxylations favorisées par la diminution du rapport C/N, l'importance des acides aminés hydroxylés diminuer sensiblement avec l'oxygène, etc...

Ainsi, l'activité microbienne réalise, suivant le milieu, une dégradation diverse des acides aminés, différemment désagrégés ou décarboxylés, plus ou moins rapidement acheminés vers la disparition de toute cette molécule qui portait la fonction amine dont la persistance sur des noyaux phénoliques représenterait, d'un acide aminé qui s'était fixé là, le dernier fragment.

RÉSUMÉ

Les acides aminés que l'on peut extraire par hydrolyse sont pratiquement les mêmes dans tous les sols et sous tous les climats.

Cependant, l'action des bactéries peut être modifiée par les conditions du milieu : la proportion des acides aminés basiques, de la lysine en particulier, sera plus grande dans les climats humides et chauds, les décarboxylations augmenteront lorsque baisse le rapport C/N, les acides hydroxylés diminueront dans les couches profondes, etc.

Plus ou moins rapidement acheminés vers leur disparition, il ne reste bientôt plus, des acides aminés, qu'une molécule de glycocolle ou même une fonction amine.

SUMMARY

Some conditions likely to modify the proportions of amino acids in soil.

The amino acids extractable by means of hydrolysis are practically the same in all soils and under all climates. However, the bacterial activity may become modified by conditions in the habitat : the proportions of basic amino acids, especially lysine, will be higher in humid and hot climates, decarboxylation would increase with a decreasing C/N ratio, and hydroxyl acids may occur in lower amounts in the deep layers.

In consequence of the more or less rapid disappearance of amino acids, ultimately there remains only a molecule of glycocoll or only an amine function.

Некоторые условия могущие изменить пропорцию аминовых кислот почвы.

Ж. КАРЛЬ и Ж. ДЕКО. (Тулуза.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Аминовые кислоты, которые могут быть извлечены гидролизом, практически одинаковы во всех почвах и во всех климатах. Но действие бактерий может быть изменено условиями среды : пропорция щелочных аминокислот, в частности лизина, повидимому более значительна в климатах жарких и влажных, декарбоксилация повидимому увеличивается при понижении отношения C/N., гидроксиловые кислоты повидимому уменьшаются в глубоких слоях.

Аминокислоты исчезают более или менее быстро, мало времени спустя от них остается только молекула гликоколля или даже функция амин.

ZUSAMMENFASSUNG

Uber einige Bedingungen welche geeignet sind die Verhältnisse der Aminosäuren der Böden zu ändern.

Die Aminosäuren welche man durch Hydrolyse extrahieren kann sind praktisch dieselben in allen Böden sowie unter allen Klimaten. Durch Einfluss der Mediumseigenschaften, kann jedoch die Einwirkung der Bakterien eine Änderung erfahren : das Verhältniss der basischen Aminosäuren, insbesondere für das Lysin, wäre viel grösser in feuchtwarmen Klimaten, die Dekarboxylationen nähmen zu, wenn das C/N-Verhältnis absinkt, und der Hydroxylsäuregehalt der tieferen Schichten hingegen nähme ab.

Mehr oder minder rasch kommt es zu ihrem Verschwinden und es bleibt, in geraumer Zeit, von den Aminosäuren nur noch ein Glykokollmolekel oder eine Amin-Funktion übrig.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) BISERTE (G.), PLAQUET-SCHOONAERT (T.), BOULANGER (P.) et PAYSANT (P.). — Séparation des acides aminés des milieux biologiques complexes. *J. Chromatog.*, **3**, 25-47, 1960.

(2) BREMNER (J. M.). — Amino-acids in soil. *Nature*, **165**, 367, 1950.

(3) BREMNER (J. M.). — The nature of soil nitrogen complexes. *J. Soil, Food, Agr.*, 497-500, 1952.

(4) BREMNER (J. M.). — Nitrogen distribution and amino-acid composition of fractions of a humic acid from a chernozem soil. *Z. Pflanzenernähr Düng. Bodenk.*, **71**, 63-66, 1955.

(5) BREMNER (J. M.). — Studies on soil humic acids I The chemical nature of humic nitrogen. *J. Agric. Sci.*, 46/2, 247-256, 1955.

(6) BREMNER (J. M.). — Studies on soil humic acids. II Observations on the estimation of free amino groups. Reactions of humic acid and lignin preparations with nitrous acid. *J. Agric. Sci.*, **48**, 3, 352-360.

(7) CARLES (J.), SOUBIES (L.) et GADET (R.). — Les acides aminés du sol et leurs variations. *C. R. Ac. Sci.*, **247**, 1229-1232, 1958.

(8) CARLES (J.) et DECAU (J.). — Variations in the amino-acids of soil hydrolysates. International Symposium on humic acids. Dublin, 1959. *Sei. Proceed. Royal Dublin Soc.*, A. 1, 177-182
(9) CARRE (M.). — Nature et rôle de quelques substances à fonction acide excrétées par les radicelles des végétaux supérieurs. *Bull. Soc. Bot. France*, **106**, 1-2, 13-16, 1959.
(10) ESTERMAN (E. F.), PETERSON (G. H.) et MCLAREN (A. D.). — Digestion of clay-protein, lignin-protein and silica-protein complexes by enzymes and bacteria. *Soil Sci. Soc. of Amer. Proc.* Vol. 23, nº 1, 31-36, 1959.
(11) FLAIG (W.). — Zur Kentniss der Huminsaüren. I. Zur Chemischen Konstitution der Huminsaüren. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.* **51**, 193, 1950.
(12) FLAIG (W.), SCHEFFER (F.) et KLAMROTH (B.). — Humic acids VIII Characterization of humic acids of soil. *Z. Pflanzenernähr. Dung. Bodenk.* **71**, 33-57, 1955.
(13) FLAIG (W.). — Die Chemie organischer Stoffe in Boden und deren physiologische Wirkung. Verhandl. II und IV Kommission der Internat. Bodenk. Ges. Hambourg II, 11-45, 1950.
(14) HAYASHI (T.) et NAGAI (T.). — Components of soil humic acid. III Nitrogenous constituents of A type humic acids. Tottori Univ. *J. Sci. soil Manure Japan*, **26**, 371-375, 1956.
(15) HOFFMAN. (E.) und HOFFMAN (G.). — Uber Herkumpt, Bestimmung und Bedeutung der Enzymes im Boden. *Z. Pflanzenernähr Düng. Bodenk.* 70-79, 1955.
(16) PARKER (D. I.), SOWDEN (F. J.) et ATKINSON (H. J.). — The nitrogen distribution and amino-acid content of certain soil organic matter fraction. *Sci. Agr.* **32**, 163-169, 1952.
(17) POCHON (J.) et de BARJAC (H.). — Traité de microbiologie des sols. Dunod, 1958.
(18) PAUL (E. A.). — The extraction and quantitative estimation of free amino-acids in soils. Dissertation abstracts. Vol. XIX, Avril, p. 2419, 1959.
(19) PAYNE (T. M. B.), ROUATT (J. W.) et KATZNELSON (H.). — Detection of free amino-acids in soil. *Soil Sci.*, Vol. 82, nº 6, 521-524, 1956.
(20) PUTNAM (H. D.) et SCHMIDT (E. L.). — Studies on the free amino-acids fraction of soils. *Soil Sci.*, Vol. 87, nº 1, 22-27, 1959.
(21) RODRIGUES (G.). — Fixed ammonia in tropical soils. *J. Soil Sci.* **5**, 264-274, 1954.
(22) SCHEFFER (F.). — Der organish gebundene Stickstoff des Bodens, Seine Verwertbarkeit. *Handbuch der Pflanzenphysiol*, VIII, 179-200, 1958.
(23) SCHEINER (O.) et SHOREY (E. C.). — The presence of arginine and histidine in soils. *J. of Biol. Chem*, **8**, 381-384, 1910.
(24) SCHWARTZ (S. M.), WARNER (J. E.) et MARTIN (W. P.). — Separation of organic acids from several dormant and incubated Ohio soils. *Soil Sci. Soc. of Amer, Proc,.* Vol. 18, 174-177, 1954.
(25) SHOREY (E. C.). — Some organic soil constituents. *U. S. Dep. Agr. Bur. of Soils Bull.*, **88**, 1913.
(26) SOWDEN (F. J.) et PARKER (D. I.) — Amino nitrogen of soils and of certain fractions isolated from them. *Soil Sci.*, Vol 76, 201-208, 1953.
(27) SOWDEN (F. J.). — Estimation of amino-acids in soil hydrolysates by the Moore and Stein method. *Soil Sci.*, Vol. 80, 181-182, 1955.
(28) SOWDEN (F. J.). — Distribution of amino-acids in selected horizons of soils profiles. *Soil. Sci.*, Vol. 82, nº 6, 491-496, 1956.
(29) SOWDEN (F. J.). — Investigations on the amounts of hexosamines found in various soils and methods for their determination. *Soil. Sci.*, Vol. 88, nº 3,138, 1959.
(30) STEVENSON (F. J.), MARCKS (J. D.), VARNER (J. E.) et MARTIN (W. P.). — Electrophoretic and chromatographic investigation of clay adsor-

bed organic colloïds : preliminary investigations. *Soil. Sci. Soc. of Amer. Proc.* Vol. 16, nº 1, 69-73, 1952.

(31) STEVENSON (F. J.). — Ion exchange chromatography of the amino-acids in soil hydrolysates. *Soil. Sci. Soc. of Amer. Proc.*, Vol. 18, 373-377, 1954.

(32) STEVENSON (F. J.). — Isolation and identification of some amino-compounds in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* vol. 20, 201-204, 1956.

(33) STEVENSON (F. J.). — Investigations of aminopolysaccharides in soils. II. Distribution of hexosamines in some soil profiles. *Soil. Sci.*, Vol. 84, nº 2, 99-106, 1957.

(34) SUSUKI (S.). — Studies on humus formation. *III Bull. Coll. Agricult.* Tokyo, 7, 513-529, 1908.

(35) TINSLEY (J.) et ZIN (M. K.). — The isolation of lignoprotein from soil Trans. V. Internat. Congr. *Soil. Sci.* II, 342-347, Leopoldville, 1954.

(36) TRUCHIN (F. V.). — Rôle de l'azote minéral et biologique dans l'agriculture de l'U. R. S. S. *Pochvovednie,* nº 6 (en russe), 1956.

(37) TURBA (F.). — Chromatographische methoden in der Protein-Chemie, Springer-Verlag. Berlin, 1954.

631. 47. (44)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE AGRONOMIQUE DE LA RÉGION D'ANCENIS

PAR

C. BOUVATTIER

Station agronomique, Nantes.

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Délimitation du terroir.

II. — Étude du terroir.

1° Géographie.
2° Géologie-pédologie.
3° Étude analytique des sols.

III. — Cultures, améliorations possibles.

I. — DÉLIMITATION DU TERROIR

La région d'Ancenis que nous étudions correspond sensiblement à la partie du bocage angevin qui déborde en Loire-Atlantique.

Ses limites naturelles sont :

— Au Nord, une ligne de hauteurs appelée « grand plateau du nord » sur laquelle s'appuie une zone de forêts (forêt de Vioreau, forêt d'Ancenis, forêt de Saint-Mars), située sur la bande ardoisière de la Meilleraie et qui forme la limite entre la culture de la vigne et la culture du pommier à cidre.

— A l'Ouest, la vallée de l'Erdre.

— Au Sud, la vallée de la Loire qui limite très nettement deux régions de type différent à la fois par le climat, le mode d'habitation et le système de culture.

La limite Est est celle qui sépare la Loire-Atlantique du Maine-et-Loire.

La région d'Ancenis ainsi délimitée couvre 92 000 ha.

II. — ÉTUDE DU TERROIR

A. — Géographie.

1° Orographie-hydrographie.

L'ensemble de la région est peu élevé. Le point culminant, au Nord de Belligné, atteint 93 m. Sauf en bordure immédiate de la Loire ou de l'Erdre où l'altitude varie de 8 à 15 m, la hauteur au-dessus du niveau



FIG. 1. — Région d'Ancenis. Carte générale et localisation des prélèvements.

de la mer varie de 30 à 70 m en moyenne. La région est assez vallonnée si bien qu'on ne peut pas parler de pente de l'ensemble. On peut, cependant, considérer que la région se relève légèrement du Sud-Ouest vers le Nord-Est, les hauteurs culminant à 40 m au Sud-Ouest et à 90 m au Nord-Est. Les rares vallées de quelque importance forment des dépressions notables.

Les pentes sont fortes sur la Loire entre Nantes et Ancenis, elles sont faibles sur la Loire après Ancenis et sur l'Erdre.

Les rivières et ruisseaux qui traversent la région d'Ancenis sont au nombre de trois. Ils ont tous la même direction, d'abord Est-Ouest, puis Nord-Sud. L'Erdre est la plus importante. Elle se jette dans la Loire à Nantes. Dans sa partie Nord-Sud, elle s'élargit au point de former de véritables lacs appelés « plaines » (plaines de Mazerolles, plaines de la Poupinière). Le Donneau passe à Pannecé, Teillé et Couffé où il devient le Havre qui se jette dans la Loire à Oudon. La Motte passe à Maumusson, Pouillé-les-coteaux et se jette dans la Loire à Ancenis après avoir traversé les marais de Grée. Ces deux ruisseaux coupent la région en parties à peu près égales.

Les petits ruisseaux qui se jettent dans l'Erdre, le Donneau et le Havre sont très nombreux, assurant ainsi un bon drainage du plateau. La partie est de la région, plus sèche, est aussi moins bien drainée : la Motte a moins d'affluents.

2° **Climat.**

Les six stations pluviométriques qui bordent la région d'Ancenis montrent des variations de la pluviosité assez constantes et assez importantes :

Pluies en mm/an	Moyenne sur 25 ans	Moyenne sur 4 ans
Nantes	745,8	678,7
Nort sur Erdre	828,8	678,5
Joué sur Erdre	717,8	644,5
Ancenis	666,4	585,7
St Mars la Jaille		557,1
Varades		440,5

On voit donc que la pluviosité va en diminuant au fur et à mesure qu'on se déplace vers l'est.

La pluviosité moyenne à Nantes depuis 77 ans est de 767,5 mm par an pour 172 jours de pluie.

La période pluvieuse se situe en automne (90 mm par mois à Nantes), mais il pleut, en fait, à peu près toute l'année (50 mm par mois à Nantes).

La température est assez uniforme ; les écarts sont réduits. A Nantes, pour 77 ans, on a :

Moyenne de l'année	11°3
Moyenne de juillet	18°3
Moyenne de janvier	4°8
Moyenne des maxima (juillet)	31°0
Moyenne des minima (janvier)	—5°1

Ce climat assez doux permet les cultures sensibles seulement aux fortes gelées, comme le chou fourrager.

De même, l'insolation est assez régulière tout au long de l'année.

Les vents dominants sont des vents de Nord à Sud-Ouest avec un maximum de fréquence en vents d'Ouest-Nord-Ouest. Les vents de tempête ont généralement cette direction. Ils sont fréquents en hiver.

3° Démographie.

La dimension moyenne des exploitations est de 15 ha. Dans certaines régions (Nort s/Erdre, Joué s/Erdre, par exemple) elles atteignent 35 à 40 ha. La statistique agricole de 1954 indique que 44 p. 100 de ces exploitations sont en faire-valoir direct et 54 p. 100 en fermage. Il y a seulement 2 p. 100 des exploitations en métayage.

Ces exploitations sont du type familial. Seules les plus grosses exploitations (à partir de 30 ha) ont un commis. Cette main d'œuvre salariée, peu nombreuse, est difficile à trouver. Les fermes sont très dispersées et très morcelées. La surface moyenne des pièces de terre est de moins de un hectare. Le remembrement se fait très lentement et seulement par échanges amiables. Il n'est pas encore entré dans les mœurs.

Le fermage se paie à la Toussaint. Il est uniquement basé sur le prix du blé et varie entre 2,5 et 3 quintaux à l'hectare.

B. — Géologie — Pédologie.

La région d'Ancenis peut être considérée comme constituée par trois étages géologiques principaux :

a) L'archéen (ζ et $\xi\gamma 1$) qui correspond à une zone de micaschistes et de micaschistes granulitiques (par infiltration de granulite dans le micaschiste) riches en mica blanc. Cette zone s'étend au Sud-Ouest d'une ligne passant par Nort s/Erdre et entre Oudon et St-Géréon.

b) Le silurien (S^{4-3}) à faciès de schistes ou de grès. Les schistes sont gris, jaunes ou rouges ; les grès sont blancs. La zone du silurien s'étend au nord de la ligne Nort s/Erdre-Ingrandes.

c) Le carbonifère (h_{IV-V}) où les grauwackes et le poudingue dominent. Les grauwackes sont constitués par des fragments de roches anciennes (quartz principalement) que réunit un ciment d'argile ferrugineuse ou de schistes argileux verts ou rouges. Le carbonifère se situe dans le triangle Nort s/Erdre-Ancenis-Ingrandes.

La majorité des sols sont des sols bruns plus ou moins lessivés (N_1 et N_2). Les sols lessivés (N_1V_2) se trouvent dans la partie nord-est de la région que nous étudions. Quelques traînées de sols faiblement podzo-

liques (V_2) bordent la zone du carbonifère dans sa partie nord et dans sa partie sud-ouest.

Les coefficients de lessivage des sols :

$$\frac{\text{argile} + \text{fer de l'horizon B}}{\text{argile} + \text{fer de l'horizon } A_2}$$

varie de 1,5 à 2 dans les sols analysés pour lesquels nous avons atteint l'horizon d'accumulation.

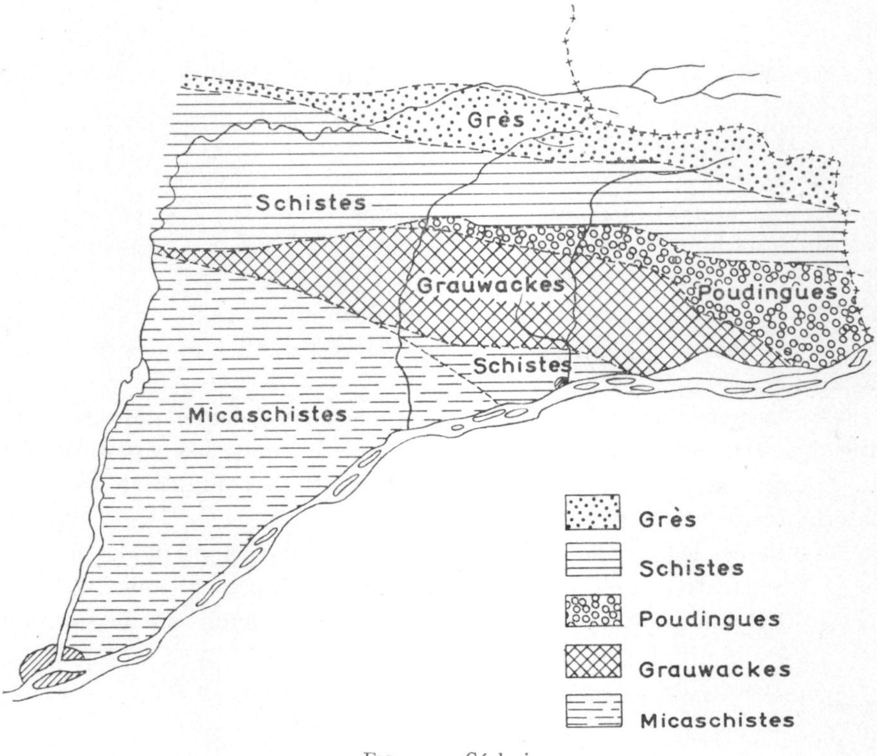


FIG. 2. — Géologie.

Les sols de la région sont généralement assez profonds. Nos prospections ne nous ont permis d'atteindre la roche mère qu'assez rarement : sur micaschistes, à St Mars du Désert ; sur schistes dans les environs d'Ancenis et à Trans s/Erdre ; sur grauwacke à St Herblon.

C. — Étude analytique des sols.

Etant donnée l'importance de la roche mère dans la composition physique et chimique des sols, nous avons classé les prélèvements analysés suivant la nature de la roche mère :

Schistes tableau I

Grauwackes	tableau II
Grès et Poudingues	tableau III
Micaschistes	tableau IV

Les résultats sont exprimés en grammes par kilogramme de terre sèche. Pour l'analyse physique, ils concernent la terre en place ; pour l'analyse chimique, ils concernent la terre fine (passant au tamis à mailles rondes de 2 mm).

1° Constitution physique.

Les différents fractionnements portés dans les tableaux correspondent à :

> 2 mm	cailloux et graviers
de 2 mm à 0,2 mm	sables grossiers
de 0,2 mm à 0,02 mm	sables fins
de 0,02 mm à 0,002 mm	limons
< 0,002 mm	argiles

Les résultats ont été obtenus de la façon suivante :

— Tamisage de la terre séchée au tamis à mailles rondes de 2 mm de diamètre.

— Dispersion par la soude N/4 de l'argile contenue dans la terre fine. La terre est préalablement débarrassée des matières organiques et du calcaire par traitement à l'eau oxygénée à 20 volumes et à l'acide chlorhydrique à 2,5 p. 100 puis lavée.

— Pesée de l'argile et du limon prélevés par la méthode pipette.

— Séparation du sable grossier et du sable fin par tamisage.

— Détermination du calcaire par dosage du calcium sur la solution chlorhydrique.

— Dosage de la matière organique par la perte au feu.

a) Les terres sur schistes.

Elles sont caractérisées par une hétérogénéité du sol dans ses différentes couches. Il n'y a pas prédominance de l'une ou l'autre fraction. Les sous-sols sont, cependant, plus caillouteux et surtout plus argileux que les sols. La figure 3 donne une représentation graphique de ce type de sols. En abscisse sont portées sur une échelle logarithmique les dimensions des particules à la limite des fractionnements. On suppose les particules concentrées au milieu de la zone représentative de chaque fraction. En ordonnée on porte le pourcentage d'éléments contenu dans chaque fraction. La courbe en trait continu représente la couche superficielle du sol et la courbe en pointillé représente la couche profonde. Les courbes correspondent à la moyenne des prélèvements analysés. On peut qualifier ce type de sols de silico-limono-argileux.

b) Les terres sur grauwackes.

Ce sont des sols souvent lourds où prédominent les éléments fins : sable fin (30 p. 100), limon (30 p. 100) et argile (20 p. 100). Ils ont très peu de cailloux ou graviers (5 p. 100) et de sable grossier (10 p. 100).

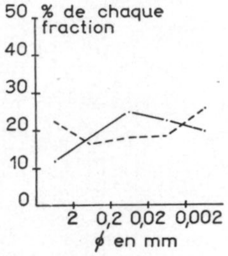


FIG. 3. — Granulométrie des schistes.

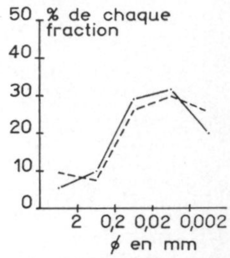


FIG. 4. — Granulométrie des Grauwackes.

La figure 4 donne la représentation graphique de l'ensemble des terres de cette catégorie. Elle permet de constater que le sol est homogène en profondeur : seules les proportions de cailloux et d'argile augmentent légèrement. On peut qualifier ces sols de limono-siliceux.

c) Les terres sur grès et poudingues.

Les sables y sont nettement prédominants, tantôt les sables grossiers (région de St Mars la Jaille), tantôt les sables fins. La figure 5 donne la représentation graphique de ces deux types différents. Elle montre que les terres sont assez homogènes dans toute leur épaisseur. Cependant, dans le triangle formé par les trois communes de La Rouxière, St Herblon et Montrelais, les sous-sols profonds sont assez imperméables. Ces terres se classent parmi les terres siliceuses ou silico-limoneuses.

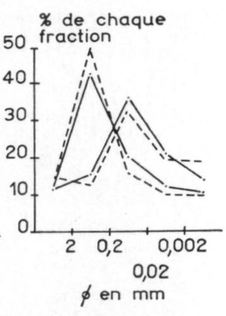


FIG. 5. — Granulométrie des grès et poudingues.

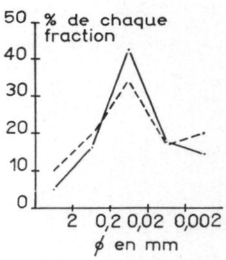


FIG. 6. — Granulométrie des micaschistes.

d) Les terres sur micaschistes.

La figure 6 montre qu'elles ont sensiblement les mêmes caractéristiques que les terres sur grès et poudingues : prédominance du sable fin encore plus marquée, compensée par une proportion un peu moindre de

cailloux ou graviers. Ces terres ont entre 10 et 20 p. 100 d'argile en surface. Elles sont donc assez faciles à travailler, mais elles sont quelquefois imperméables à partir de 50 cm de profondeur. Ce sont des terres silico-limoneuses.

Ainsi, en se basant sur la teneur en argile, on peut déterminer deux zones dans la région d'Ancenis :

— Une zone de terres assez lourdes (schistes et grauwackes) contenant environ 20 p. 100 d'argile en surface et 25 p. 100 en profondeur. Cette zone est comprise entre deux lignes passant, l'une au sud-ouest de Ligné et St Géréon et l'autre par Riaillé, Pannecé, Belligné et Varades.

— Une zone de terres assez légères (grès, poudingues et micaschistes) contenant environ 15 p. 100 d'argile en surface et 15 à 20 p. 100 en profondeur. Cette zone entoure la précédente au Nord-Est et au Sud-Ouest.

2° **Constitution chimique.**

a) *Réaction. — Besoin en chaux.*

La figure 7 représente la carte des pH. Les points blancs indiquent les pH des prélèvements analysés. Le chiffre supérieur indique le pH de la surface, le chiffre inférieur le pH de la couche profonde. Les points noirs représentent les communes et le chiffre indiqué représente la moyenne des pH des terres analysées dans la commune depuis 1955, leur nombre variant, suivant les communes, de 30 à 140.

Nous constatons ici le même fait que Joret et Malterre (5 et 6) et Garola (4) à la suite des américains Jenny et Léonard. On observe, en effet, la même relation entre le pH et la hauteur d'eau tombée. La nature de la roche mère et l'action des praticiens modifient légèrement cette relation, mais le tableau V ci-dessous montre qu'elle est encore assez nette : plus le climat est humide, plus la réaction est acide. Les pH sont souvent un peu inférieurs à ceux déterminés par Jenny et Léonard. Cela peut s'expliquer par le fait que nous sommes légèrement au-dessus de l'isotherme 11° qu'ils ont pris comme référence.

Tableau V

Hauteur moyenne des pluies	pH moyen observé	pH calculé d'après Jenny et Léonard
828,8 (Nort s/E.)	6,1	6,1
717,8 (Joué s/E.)	6,3	6,6
745,8 (Nantes)	6,4	6,5
666,4 (Ancenis)	6,8	6,9

Le besoin en chaux a été déterminé par la mesure de l'acidité hydrolytique. En tablant, pour un hectare, sur 3 000 t de terre arable, il y aurait

lieu d'apporter aux terres acides de : (n° 3) 3 000 × 0,33 = 1 000 kg de chaux vive (ou 2 000 kg de calcaire), à : (n° 21) 3 000 × 1,20 = 3 600 kg de chaux vive (ou 7 tonnes de calcaire). En moyenne, les sols ont besoin d'un apport de 2 tonnes de chaux vive ou 4 tonnes de calcaire pur.

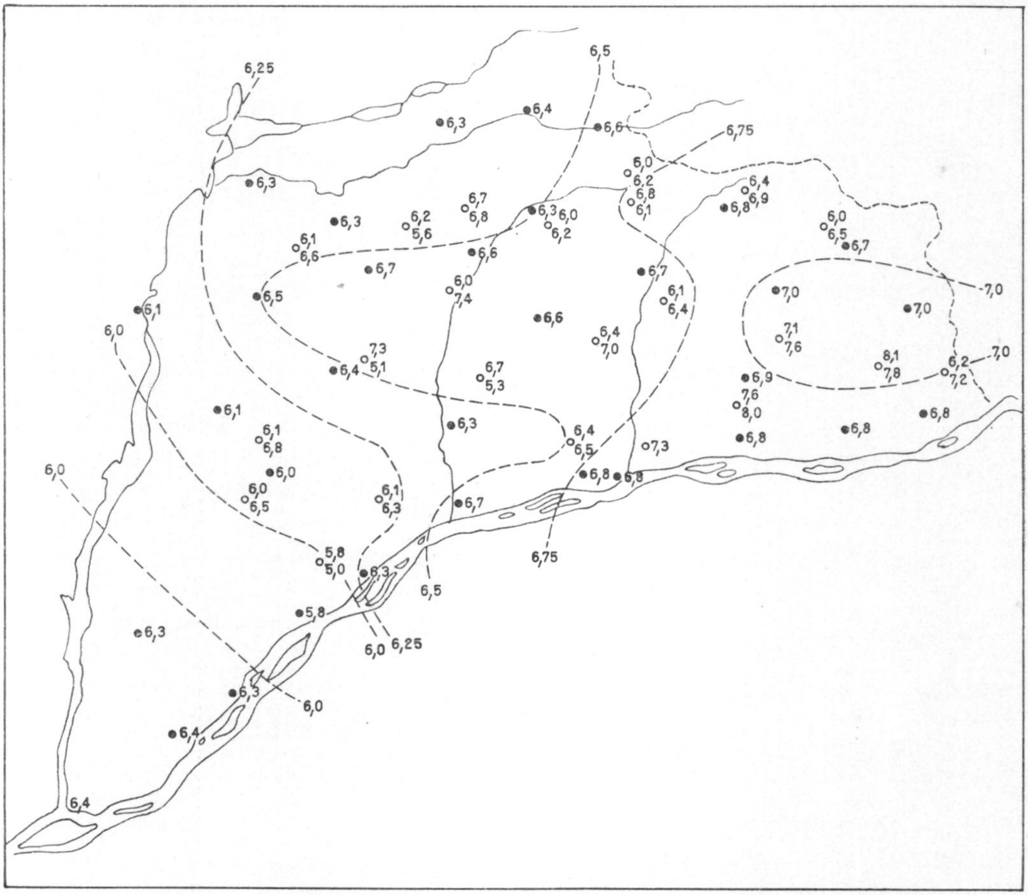


FIG. 7. — Carte des pH.

b) *Azote. — Matière organique.*

En admettant comme moyenne une teneur en azote de 1,2 pour mille, on peut considérer que toutes les terres étudiées sont suffisamment pourvues en cet élément.

Le dosage du carbone organique par la méthode de ANNE (1) permet de déterminer des rapports C/N qui varient de 8,1 à 11,5 et sont, en moyenne, de :

10,1 pour les sols de culture ;

10,7 pour les sols de bonnes prairies ;

8,8 pour les sols de prairies dégradées.

Les deux sols qui atteignent ou dépassent 11,0 sont des sols de prairie, légers en surface, mais très humides à partir de 25 cm. Cette humidité peut expliquer la vie microbienne un peu anormale qu'indiquent ces chiffres.

Par contre, le rapport C/N est de l'ordre de 8 dans un certain nombre de sols. Il s'agit, en fait, presque exclusivement, de prairies en très mauvais état. Leur rapport C/N est celui qu'on trouve normalement dans les sous-sols. Il indique des sols épuisés qui n'ont pas reçu de fumure organique depuis longtemps (2).

Les sols de culture ont un rapport C/N de 10, normal en zone tempérée humide.

En résumé, à l'exception des prairies dégradées, les sols présentent des propriétés biologiques normales.

c) *Acide phosphorique.*

Si l'on table sur une quantité d'acide phosphorique assimilable de 0,25 pour mille en terre moyenne, l'examen des tableaux I, II, III et IV montre que quatre sols seulement dépassent ce chiffre (n^os^ 6,11,

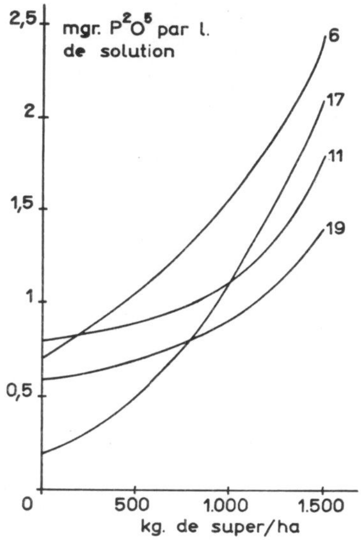


FIG. 8.

15 et 19) et que deux atteignent 0,23 pour mille (n^os^ 3 et 9). Tous les autres sols contiennent en moyenne 0,07 pour mille d'acide phosphorique assimilable. Les sous-sols profonds ne contiennent pas du tout d'acide

phosphorique. Les besoins en acide phosphorique sont donc très grands et ne sont généralement pas couverts par des apports suffisants.

Nous avons déterminé ces besoins pour quelques terres choisies plus en fonction de leur teneur en argile ou en fer qu'en fonction de leur teneur en acide phosphorique assimilable. Nous avons adopté la technique de DEMOLON et BOISCHOT (3) qui permet d'apprécier la dose de phosphate soluble (superphosphate) nécessaire pour amener la concentration de la solution du sol à la dose optimum de 1 mg de P_2O_5 par litre.

Les chiffres obtenus permettent de tracer les courbes de la figure 8. Ces courbes déterminent les doses de super suivantes :

Nos	P_2O_5 assimilable p. mille	Argile p. mille	Fer libre p. mille	Dose de super par ha en kg
6	0,30	103	5,6	450
11	0,48	226	7,4	800
17	0,03	108	19,3	950
19	0,55	219	19,3	1 150

On constate que ces quantités ne sont pas en relation avec la teneur en acide phosphorique dit « assimilable » mais qu'elles sont liées à la teneur en argile et en fer qui ont un pouvoir fixateur important vis-à-vis de l'acide phosphorique comme l'ont montré DEMOLON et BOISCHOT.

Malgré leur teneur élevée en acide phosphorique assimilable, les terres nos 6, 11 et 19 ont des besoins importants en acide phosphorique. On peut donc dire que toutes les terres de la région d'Ancenis, même les plus riches, ont des besoins élevés en acide phosphorique.

d) Potasse.

L'examen de la richesse en potasse des couches profondes montre que les sols sont naturellement moins pauvres en potasse qu'en acide phosphorique. Le minimum est de 0,05 pour mille.

Si on considère qu'une quantité de 0,25 pour mille est souhaitable dans la couche cultivée, on constate que six terres seulement (nos 1, 9, 11, 15, 19 et 23) sont suffisamment pourvues en potasse. Pour les autres, la quantité de potasse assimilable varie de 0,07 pour mille à 0,20 pour mille avec une moyenne de 0,11 pour mille.

Si, comme pour l'acide phosphorique, on veut tenir compte du pouvoir de rétention du sol et de sa capacité d'échange, il est indiqué de ramener la quantité de potasse dosée à cette capacité d'échange, c'est-à-dire, pratiquement, au pouvoir absorbant de l'argile. On établit donc le rapport :

$$\frac{\text{potasse assimilable en mg}}{\text{argile en g}}$$

TABU III

Grès eudingues

Nº du prélèvement	Localisation du prélèvement	Mode d'exploitation	Profondeur en cm	Graviers et cailloux	Sable grossier	Sable fin	Limon	Argile	CO_3Ca	Matière organique	pH	Besoin en chaux	Azote total	Carbone organ.	C/N	P_2O_5 assimilable	K_2O assimilable	mg K_2O par g argile	MgO échangeable	CaO échangeable	CaO/MgO	Fer libre
5	St-Mars la Ja.	prairie	0-20	130	372	241	126	102	4	25	6,0	0,66	1,5	16,0	10,7	0,07	0,07	0,60	0,30	1,34	4,5	7,7
	La Taillanderie		20-40	160	376	247	70	132	3	12	6,1		0,8			0,02	0,05		0,17	1,17	6,9	8,8
			40-90	100	478	208	119	90	2	3	6,2		0,2			0,01	0,05		0,15	0,56	3,7	6,1
6	Pannecé	prairie	0-15	120	476	159	105	103	6	31	6,8		1,7	20,1	11,5	0,30	0,15	1,28	0,17	2,52	14,8	5,6
	La Cantinière		15-30	160	503	130	97	92	3	15	6,4		0,9			0,07	0,11		0,09	1,18	13,1	5,1
			30-80	160	547	111	70	105	3	4	6,1		0,2			0,05	0,08		0,16	0,67	4,2	1,8
7	Maumusson	culture	0-15	120	233	322	153	142	6	23	6,1	0,47	1,6	14,6	9,3	0,04	0,14	0,86	0,20	1,93	9,6	9,9
			15-30	120	222	336	171	132	5	14	6,5		1,0			0,02	0,10		0,13	1,71	13,1	10,9
			30-60	180	193	256	163	196	4	8	6,9		0,4			0,01	0,07		0,08	1,65	20,6	14,1
8	Belligné	prairie	0-15	190	166	345	141	117	6	35	6,0	0,80	2,1	21,3	10,0	0,10	0,08	0,55	0,47	2,29	4,9	7,6
	Le Brulé		15-30	220	156	328	167	107	5	17	6,1		1,1			0,03	0,06		0,21	1,78	8,5	9,4
			30-60	280	133	303	133	142	4	5	6,5		0,3			0,01	0,06		0,09	1,28	14,2	10,3
10	La Rouxière	culture	0-20	100	74	344	267	190	6	19	7,1		1,4	12,2	8,7	0,04	0,14	0,67	0,17	2,52	14,8	14,1
	Le Dreuillet		20-40	60	68	333	282	240	6	11	7,5		0,8			0,02	0,08		0,30	2,35	7,8	17,1
			40-60	20	47	330	276	312	6	9	7,6		0,6			0,01	0,08		0,27	2,52	9,3	20,7
16	Varades	culture	0-20	60	125	387	254	134	11	29	8,1		1,3	13,1	10,0	0,16	0,08	0,56	0,21	3,94	18,7	9,2
	Les Landes		20-40	80	115	412	223	149	8	13	8,2		0,7			0,03	0,07		0,24	2,90	12,1	10,6
			40-60	120	94	326	183	269	6	2	7,8		0,1			0	0,06		0,35	2,34	6,7	11,2
17	Montrelais	prairie	0-15	100	165	393	221	93	5	23	6,2	0,50	1,4	12,0	8,4	0,03	0,07	0,68	0,25	1,63	6,5	17,9
	Le Plessis	dégradée	15-30	100	166	384	229	98	5	18	6,7		1,1			0,01	0,06		0,27	1,57	5,8	21,7
			30-50	120	153	349	255	108	5	10	7,2		0,5			0,01	0,05		0,21	1,51	7,2	19,3

TABL IV

Micaistes

Nº du prélèvement	Localisation du prélèvement	Mode d'exploitation	Profondeur en cm	Graviers et cailloux	Sable grossier	Sable fin	Limon	Argile	CO_3Ca	Matière organique	pH	Besoin en chaux	Azote total	Carbone organ.	C/N	P_2O_5 assimilable	K_2O assimilable	mg K_2O par g argile	MgO échangeable	CaO échangeable	CaO/MgO	Fer libre
20	Ligné	prairie	0-20	80	248	421	115	115	4	17	6,1	0,50	1,2	9,8	8,2	0,11	0,08	0,64	0,25	1,43	5,7	7,7
	La Griferaie	dégradée	20-50	140	217	371	149	114	3	6	6,3		0,6			0,3	0,06		0,33	1,01	3,1	6,9
			50-60	260	281	243	86	122	3	5	6,8		0,3			0	0,06		0,37	1,01	2,7	12,0
21	Le Cellier	prairie	0-20	40	147	402	157	189	5	60	6,1	1,20	2,6	27,4	10,5	0,02	0,12	0,61	0,73	1,83	2,5	12,7
	La Maladrie		20-50	160	162	322	165	158	4	29	6,1		1,4			0,01	0,12		0,68	1,72	2,5	19,4
			50-80	80	137	334	108	314	5	22	6,3		1,0			0	0,10		1,23	1,80	1,5	35,4
22	St-Mars du D.	culture	0-20	50	196	423	153	145	4	29	6,0	0,87	1,4	14,8	10,5	0,03	0,07	0,46	0,42	1,68	4,0	14,8
	La Croix		20-30	90	331	337	81	140	4	17	6,4		0,5			0,01	0,04		0,33	1,64	5,0	17,7
			30-50	70	323	350	79	158	5	15	6,5		0,4			0,01	0,05		0,33	1,64	5,0	19,5
23	Le Cellier	culture	0-20	30	71	455	287	113	4	40	5,8	0,87	1,8	18,4	10,2	0,10	0,53	0,45	0,40	1,18	3,0	9,3
	La Simonière		20-30	40	59	465	265	140	4	27	5,2		1,0			0,02	0,16		0,27	0,79	2,9	11,2
			30-50	10	55	426	282	213	4	10	5,1		0,4			0,01	0,09		0,32	0,90	2,8	16,5
			50-70	0	45	407	244	288	4	12	5,0		0,5			0	0,12		0,43	1,08	2,5	24,4

TABLEAU I

Schistes

N° du prélèvement	Localisation du prélèvement	Mode d'exploitation	Profondeur en cm	Graviers et cailloux	Sable grossier	Sable fin	Limon	Argile	CO_3Ca	Matière organique
1	Trans-s-Erdre	prairie	0-10	60	60	236	222	357	9	56
	La Grossière		15-40	40	87	182	163	209	4	15
2	Trans-s-Erdre	prairie	0-20	80	384	248	138	119	5	26
	Fosse-Loire		20-40	200	313	185	120	172	4	6
			40-70	140	327	122	77	325	5	4
3	Teillé	culture	0-20	50	210	234	296	180	7	23
	L'Avenue		20-40	120	260	193	249	160	5	13
			40-90	190	178	162	205	254	4	7
4	Pannecé	prairie	0-20	240	154	197	225	148	3	33
	La Rioulière	dégradée	20-40	300	156	176	188	159	3	18
			40-100	340	111	130	176	235	3	5
18	Saint-Géréon	culture	0-20	100	132	281	265	177	7	38
	Le Bois Robin		20-30	90	96	269	253	257	7	28
19	Saint-Herblon	prairie	0-25	190	168	171	212	219	8	32
	Le Jarier	dégradée								

N° du prélèvement	Profondeur en cm	pH	Besoin en chaux	Azote total	Carbone organ.	C/N	P_2O_5 assimilable	K_2O assimilable	mg K_2O par g argile	MgO échangeable	CaO échangeable	CaO/MgO	Fer libre
1	0-10	6,1	1,06	3,1	31,4	10,1	0,13	0,32	0,84	0,38	3,43	9,0	12,8
	15-40	6,6		1,3			0	0,29		0,26	1,96	7,5	13,3
2	0-20	6,2	0,70	1,5	16,6	11,0	0,09	0,20	1,55	0,25	1,78	7,1	2,9
	20-40	6,5		0,6			0,01	0,07		0,25	1,47	5,9	11,2
	40-70	5,6		0,5			0	0,08		0,32	1,92	6,0	12,9
3	0-20	6,7	0,33	1,5	15,7	10,4	0,23	0,16	0,84	0,28	2,41	8,6	6,9
	20-40	6,9		0,9			0,08	0,11		0,26	2,07	8,0	7,5
	40-90	6,8		0,6			0,01	0,09		0,34	1,90	5,6	20,2
4	0-20	6,0	0,83	2,2	21,0	9,6	0,02	0,12	0,62	0,41	1,68	4,1	15,0
	20-40	6,1		1,2			0,01	0,10		0,37	1,45	3,9	16,1
	40-100	6,2		0,6			0	0,10		0,36	1,34	3,7	24,3
18	0-20	6,4	0,76	2,1	21,5	10,3	0,11	0,19	1,07	0,48	2,99	6,2	17,9
	20-30	6,5		1,4			0,04	0,14		0,55	2,64	4,8	21,7
19	0-25	7,3		2,1	19,9	9,8	0,55	0,54	2,0	0,61	3,90	6,4	19,3

TABLEAU II

Grauwackes

N° du prélèvement	Localisation du prélèvement	Mode d'exploitation	Profondeur en cm	Graviers et cailloux	Sable grossier	Sable fin	Limon	Argile	CO_3Ca	Matière organique
9	Teillé	prairie	0-20	80	189	241	280	160	6	44
	La Tournerie		20-50	60	181	277	289	167	5	21
			50-80	160	148	236	269	170	4	13
11	Ligné	culture	0-20	40	88	292	311	226	9	34
	La Vallée		25-50	40	50	235	300	356	6	13
			50-80	240	55	176	225	289	3	12
12	Couffé	prairie	0-15	10	65	414	346	136	5	24
	Bel Air	dégradée	15-40	20	62	423	310	167	5	13
			50-80	10	45	379	306	250	4	6
			90-110	10	116	338	291	238	2	5
13	Mésanger	prairie	0-20	40	59	322	300	232	7	40
	Le Boulay	dégradée	20-50	50	83	346	271	224	5	21
			50-90	60	37	392	296	202	4	9
14	Saint-Herblon	prairie	0-20	60	59	285	326	214	8	48
	Les Maraines		20-50	60	63	258	329	251	6	33
15	Saint-Herblon	prairie	0-20	90	163	165	320	223	10	29
	Roche Pallière	dégradée	20-50	40	111	116	343	370	10	10

N° du prélèvement	Profondeur en cm	pH	Besoin en chaux	Azote total	Carbone organ.	C/N	P_2O_5 assimilable	K_2O assimilable	mg K_2O par g argile	MgO échangeable	CaO échangeable	CaO/MgO	Fer libre
9	0-20	6,0	0,47	1,8	18,7	10,7	0,23	0,25	1,44	0,41	2,24	5,5	6,5
	20-50	7,0		0,8			0,01	0,09		0,45	1,64	3,6	6,3
	50-80	7,4		0,4			0,01	0,08		0,68	1,71	2,5	6,6
11	0-20	7,3		1,6	17,3	10,5	0,48	0,27	1,15	0,33	3,22	9,8	7,4
	25-50	6,1		0,7			0,01	0,09		0,45	2,06	4,6	11,1
	50-80	5,1		0,6			0	0,09		0,52	1,26	2,4	13,2
12	0-15	6,7	0,40	1,3	12,4	9,3	0,10	0,06	0,44	0,38	2,07	5,5	12,6
	15-40	6,8		0,8			0,04	0,05		0,44	1,79	4,1	12,4
	50-80	6,2		0,4			0,01	0,08		0,66	1,45	2,2	18,3
	90-110	5,3		0,3			0,01	0,08		1.13	0,50	0,4	20,2
13	0-20	6,4	0,66	2,6	20,9	8,1	0,05	0,20	0,83	0,41	2,87	7,0	13,5
	20-50	6,7		1,4			0,02	0,19		0,30	1,76	5,9	11,9
	50-90	7,0		0,6			0,01	0,21		0,32	1,31	4,1	13,8
14	0-20	6,1	0,90	2,6	27,0	10,2	0,03	0,08	0,35	0,34	2,88	8,5	18,6
	20-50	6,4		1,8			0	0,08		0,35	2,18	6,2	18,1
15	0-20	7,6		2,1	17,4	8,1	0,33	0,30	1,22	0,30	4,63	15,4	12,8
	20-50	8,0		0,7			0,06	0,12		0,35	4,53	12,9	23,2

On peut considérer un sol comme bien pourvu lorsque ce rapport atteint 1,5. Dans ces conditions, une terre seulement est bien pourvue en potasse (n° 2) et une autre approche sensiblement ce chiffre (n° 9). Toutes les autres terres indiquent des besoins importants en potasse que les fumures habituelles ne couvrent pas.

En même temps que la potasse assimilable, nous avons dosé la potasse échangeable (percolation de la terre avec l'acétate d'ammonium normal), mais, comme l'avaient déjà constaté plusieurs auteurs, il n'y a pas de différence notable entre les chiffres trouvés par les deux méthodes. Nous n'avons donc indiqué dans les tableaux I à IV que les chiffres obtenus pour la potasse assimilable.

e) *Chaux et magnésie.*

L'extraction de la chaux et de la magnésie a été faite sous la forme échangeable. La chaux a été dosée par l'oxalate d'ammonium et la magnésie par la méthode de MAZOYER (7).

Si on considère qu'une terre contenant 0,25 pour mille de magnésie échangeable est suffisamment pourvue, on constate que les sols de la région étudiée sont assez riches en magnésie dans leur ensemble. Seuls deux sols (n^os^ 6 et 7) n'atteignent pas ce chiffre, même en profondeur. Deux autres sols sont en dessous de la normale en surface, mais sont bien pourvus en profondeur (n^os^ 10 et 16). Il n'y a donc pas de danger immédiat de carence magnésienne dans cette région.

La chaux échangeable est en rapport assez constant avec la chaux soluble à froid dans l'acide chlorhydrique dilué puisque ce rapport varie de 1,2 à 1,9. On peut donc dire qu'une grande partie de la chaux présente dans le sol est facilement assimilable par les plantes.

Cependant à l'exception des terres n^oo^ 6, 10, 15, et 16, les rapports CaO/MgO sont faibles. La moyenne de 6,2 indique un manque de chaux que la détermination du besoin en chaux nous avait déjà permis de constater.

f) *Fer libre.*

Nous l'avons dosé par la méthode de DEMOLON à l'acide oxalique à 2 p. 100.

Le fer se trouve en quantité assez importante dans tous les sols à l'exception des sols sur grès.

Son rôle dans la rétrogradation de l'acide phosphorique a déjà été mis en évidence à propos de cet élément.

Le fer joue également un rôle important par sa migration dans le sol. Son accumulation dans l'horizon B, sensible surtout pour les prélèvements n^os^ 3, 4, 15, 16, 20, 21 et 23, provoque la formation d'une sorte d'alios

appelé « renard » dans la région. Ce « renard » est imperméable et caillouteux et les racines ne peuvent pas le franchir. Il se trouve généralement à une profondeur suffisante pour ne pas être une gêne pour les cultures. Cependant, à certains endroits, il affleure à 30 cm de la surface et peut provoquer des troubles dans le développement des cultures et, surtout, des arbres fruitiers et de la vigne.

III. — CULTURES — AMÉLIORATIONS POSSIBLES

1° Écologie.

Dans son ensemble, la région d'Ancenis est une région d'élevage. Plus de la moitié de la surface du sol est utilisée pour la production fourragère, mais les différences de climat entre l'Est et l'Ouest et la nature différente des sols entraînent une certaine diversité dans le mode d'exploitation.

La répartition des terres est la suivante pour la région qui nous intéresse, d'après la statistique agricole de 1954 :

	%
Terres cultivées	55,6
Prairies naturelles	28,2
Vigne et arboriculture	4,5
Forêts et bois	5,7
Friches et divers	6,0

La répartition des terres cultivées est la suivante :

	%
Prairies artificielles et temporaires	37,0
Blé	20,9
Céréales secondaires	10,9
Chou fourrager	11,4
Betteraves fourragères	6,9
Pommes de terre	4,1
Jachères et divers	8,8

Bien que les différences observées suivant la nature du sol ou le climat soient peu importantes — et l'emploi des techniques modernes contribue encore à les atténuer — on peut cependant noter que :

— L'Est de la région, où les étés sont secs et ensoleillés, est plus favorable à l'arboriculture et à la production fruitière.

— Sur grauwackes, les terres consacrées à la production fourragère représentent 63 p. 100 de la surface cadastrée. C'est sur ces terres que la surface consacrée à la production fourragère est la plus importante. Plus de la moitié de cette surface est représentée par des prairies naturelles. Il s'agit, en effet, de terres lourdes, difficiles à travailler. Au contraire, sur poudingues, où la surface consacrée à la production fourragère est aussi importante, les prairies naturelles ne représentent que 40 p. 100 de

cette surface. Il s'agit là de terres légères, donc faciles à travailler, et les cultures y sont plus rentables.

— Sur grauwackes, bien que la proportion de terres cultivées soit moindre qu'ailleurs, la surface consacrée à la culture du blé est plus importante : 13 p. 100 de la surface cadastrée alors qu'elle n'est que de 10 p. 100 sur micaschistes. Les premières sont des terres assez profondes et assez lourdes qui conviennent bien au blé. Les secondes sont souvent peu profondes. C'est sur poudingues que la surface consacrée aux terres labourées est la plus importante.

— Les terres sur micaschistes sont situées à proximité de Nantes, ce qui augmente leur valeur et modifie la vocation naturelle qu'elles tiendraient de la nature du sol. C'est là qu'on trouve surtout les cultures maraîchères et, en bordure de la Loire, la vigne.

— Du point de vue production animale, les différences de climat entre l'Est et l'Ouest entraînent un mode d'exploitation différent :

— à l'Ouest d'une ligne passant par Bonnœuvre, Pannecé et Mésanger, on a une région de production laitière favorisée par la possibilité du pâturage pendant l'hiver. Dans les fonds, la prairie naturelle est particulièrement bien à sa place ;

— à l'Est de cette ligne, c'est la production de viande qui domine, mais la création récente d'une laiterie par la coopérative d'Ancenis tend à favoriser la production laitière dans cette zone.

— La production animale est plus importante sur les terres sur grauwackes et schistes (0,6 et 0,7 bovin par hectare de terre exploitée et 0,5 et 0,4 porcin) qui sont assez lourdes; elle est plus faible sur les terres sur micaschistes (0,55 bovin et 0,2 porcin). En ce qui concerne les porcs, la différence est due surtout au fait que les terres sur shistes et grauwackes entourent Ancenis dont le marché, spécialisé dans cette production (porcelet d'Ancenis), la favorise alentour.

En résumé, la région d'Ancenis est essentiellement une région d'élevage favorisé à la fois par le sol et par le climat. Le sol est trop morcelé et les rendements insuffisants pour que le blé soit une culture vraiment rentable. Certaines terres sur grès et poudingues, trop légères ne lui conviennent pas. Il y a donc lieu de favoriser le développement des cultures fourragères et des nouvelles techniques de culture de l'herbe. L'emploi de ces techniques devrait aboutir dans un avenir assez proche à une diminution sensible de la surface consacrée aux prairies naturelles car celles-ci, généralement dégradées, sont pratiquement improductives.

2° Assolement.

En principe, l'assolement est quadriennal. En fait, l'assolement type subit de fréquentes modifications suivant les besoins en fourrage

de l'exploitation. Le plus souvent, on a la succession des cultures suivantes :

Plante sarclée (betterave ou pomme de terre),
Blé,
Céréale secondaire ou trèfle incarnat,
Chou fourrager.

Certains cultivateurs sèment du trèfle violet dans le blé et gardent le trèfle deux ou trois ans. D'autres font une orge de printemps ou une prairie temporaire après chou. On trouve aussi l'assolement : chou-orge-blé.

Les techniques actuelles de culture de l'herbe entraînent une modification dans ces assolements en augmentant la surface en fourrage de l'exploitation. Cette « révolution fourragère » comme on l'a appelée n'est pas encore entrée complètement dans les mœurs et il reste encore de grands progrès à faire pour utiliser au mieux les possibilités offertes par les progrès récents dans différents domaines (exploitation de l'herbe, semences sélectionnées de graminées, variétés de betteraves ou de choux à haute valeur nutritive, etc). Cet effort dans la production fourragère doit s'accompagner d'un effort parallèle dans le domaine de la production animale (races sélectionnées, formules d'alimentation équilibrées, logement des animaux, etc.).

Pour que ces améliorations puissent se faire, il faut d'abord provoquer un changement de mentalité de la part des praticiens. C'est la raison pour laquelle les nouvelles techniques ne pénètrent que lentement. Beaucoup de cultivateurs vivent encore en autarcie et ne conçoivent pas d'abandonner certaines productions nécessaires à leur subsistance, mais non rentables, pour en adopter d'autres mieux adaptées à leur sol et à leur région.

3° **Façons culturales.**

Elles sont assez souvent anormales. Pour le blé, le labour qui permet l'enfouissement de la fumure de fond est satisfaisant, mais les façons superficielles sont insuffisantes et le blé est souvent semé dans un sol trop creux.

Pour les plantes sarclées (chou et betterave), on voit souvent effectuer deux labours de printemps à quinze jours ou trois semaines d'intervalle, juste avant semis ou plantations, quelquefois après un labour d'automne pour enfouir le fumier. Un seul labour suffirait, suivi d'un travail au cultipacker, par exemple, pour émietter la terre en surface.

4° **Amendements et fumures.**

La nature physique des sols est suffisamment bonne, dans l'ensemble, pour ne pas nécessiter l'apport massif d'amendements calcaires en vue de l'améliorer. On se contentera donc des doses indiquées plus haut. Dans

les terres très acides, cet apport devra s'échelonner sur trois ans pour ne pas modifier trop brusquement l'acidité du sol et permettre ainsi à la microflore de s'adapter lentement à la nouvelle composition chimique du sol.

Les praticiens ont l'habitude d'apporter 30 à 40 tonnes de fumier en tête d'assolement. Cette quantité convient bien et permet de maintenir le sol en bon état humique.

Les fumures minérales habituellement pratiquées sont très aléatoires. Elles sont suffisantes pour le blé (sauf en ce qui concerne l'azote) mais très insuffisantes pour les autres cultures. Sur les plantes sarclées, par exemple, on ne met que des scories ou du super, ou bien des engrais composés en petites quantités (200 kg de 5-10-10 par hectare, par exemple). Sur céréales secondaires, on n'apporte, la plupart du temps, aucune fumure.

Bien que toutes les terres analysées soient bien pourvues en azote total, les essais de fumure effectués montrent que des apports d'azote conduisent à des augmentations de rendement qui sont rentables.

Des essais sur blé réalisés pour expérimenter la méthode Coïc dans la région étudiée ont été effectués en 1953, 1954 et 1955 à Mésanger, Ligné, La Rouxière et St Mars du Désert. Les résultats globaux portant sur six essais ont été les suivants :

	Rendement moyen	Supplément de bénéfice en 1955/ha sur un seul épandage
30 kg d'N au tallage	33.6 qx	—
+ 25 kg à la montaison	39,6 qx	158,30 NF
+ 20 kg à l'épiaison	43,4 qx	251,55 NF

En pratique, devant les difficultés de l'épandage à l'épiaison et devant les risques de sécheresse en juin-juillet qui rend inefficace l'apport d'azote à l'épiaison, on peut se contenter des épandages au tallage et à la montaison en augmentant les doses d'azote apportées : 40 kg au tallage et 30 kg à la montaison.

Deux essais sur prairies, l'une naturelle, l'autre temporaire, effectués en 1956 à St Mars du Désert et à Maumusson ont montré également l'intérêt de la fumure azotée même en terres riches en azote total. Les résultats en sont les suivants :

	Prairie temporaire kg d'azote par ha			Prairie naturelle kg d'azote par ha		
	0	66,5	133	0	20	40
Rendements en foin (en T/ha)	5,02	8,75	15,59	2,75	4,40	7,64
Supplément de bénéfice (NF) par hectare sur le témoin	—	285,50	884,0	—	149,0	437,0

Sur la prairie temporaire, l'azote a été apporté en quatre fois de mars à août. Le foin a été compté de 0,10 NF le kg. Ces essais montrent que la dose forte est la plus intéressante sur prairies. On peut donc conseiller d'apporter après chaque passage d'animaux ou fauchage 30 kg d'azote par hectare sous forme nitrique.

Compte-tenu des essais effectués et de la composition physico-chimique de la terre, il y aurait lieu d'appliquer les fumures suivantes aux cultures (en kg/ha d'éléments simples), en notant que plus des trois quarts des terres sont justiciables de la dose forte indiquée :

Culture	N	P_2O_5	K_2O
Blé (variété genre Cappelle)	40 + 30 (a)	80 à 135	80 à 125
Plante sarclée (avec fumier)	40 à 80 (b)	60 à 110	80 à 150
Céréale secondaire	30 à 40 (c)	60 à 110	60 à 110
Prairie (à la création)	30	110 à 160	110 à 150
Prairie (entretien)	30 (d)	80 à 130	80 à 120

(a) 40 kg au tallage sous forme ammoniaco-nitrique et 30 kg à la montaison sous forme nitrique
(b) De préférence sous forme de sulfate d'ammoniaque ou d'urée.
(c) En janvier-février sous forme ammoniaco-nitrique.
(d) Sous forme nitrique après chaque passage d'animaux ou chaque fauchage de l'herbe.

5° **Rendements.**

Ils varient sensiblement d'une terre à l'autre. On peut, cependant, considérer comme fréquents les rendements suivants :

Blé	20 à 25 quintaux par hectare
Betteraves	50 à 60 tonnes par hectare
Chou 1/2 moellier	50 à 60 tonnes par hectare
Pommes de terre	15 à 20 tonnes par hectare

Un effort est actuellement entrepris pour améliorer les fumures et les variétés. Cet effort devrait permettre d'augmenter sensiblement les rendements, mais il se heurte à des habitudes très anciennes. Par exemple, l'échange de semences entre les cultivateurs est fréquent, si bien que les bonnes variétés elles-mêmes, après plusieurs années de cette pratique, finissent pas donner des rendements médiocres. Que ce soit pour le blé ou le chou, le praticien a l'habitude de récolter sa graine lui-même selon des principes de sélection assez empiriques. Il est à prévoir que lorsque l'ensemble des cultivateurs aura adopté l'emploi de semences sélectionnées, aura abandonné les cultures les moins rentables et appliquera les fumures nécessaires, la région connaîtra un surcroît de prospérité.

RÉSUMÉ

Contribution à l'étude agronomique de la Région d'Ancenis.

L'auteur étudie la Région d'Ancenis (Loire-Atlantique) au point de vue agronomique.

Cette région est essentiellement constituée par des terrains de la période archéenne et de la période primaire (Silurien et carbonifère). L'ensemble de la région est peu élevé. Le climat est du type océanique : doux et régulièrement humide. Il s'agit d'une région de petites exploitations du type familial.

On distingue quatre catégories principales de sols :

Les terres sur schistes qui sont silico-limono-argileuses.

Les terres sur grauwackes qui sont limono-siliceuses.

Les terres sur grès et poudingues qui sont siliceuses ou silico-limoneuses.

Les terres sur micaschistes qui sont silico-limoneuses.

Au point de vue chimique, il s'agit de terres légèrement acides, bien pourvues en matières organiques et dont les propriétés biologiques (sauf pour les prairies dégradées) sont normales. Les besoins en acide phosphorique et en potasse sont importants. Les engrais azotés sont toujours nécessaires.

Il résulte de ces constatations que la région d'Ancenis est avant tout une région d'élevage. La proportion des terres à production fourragère (65 %) permet de conclure que la vocation de la région est respectée dans l'ensemble. Il y a cependant des progrès à faire pour améliorer la rentabilité des exploitations en utilisant au mieux les possibilités offertes par les progrès récents dans les différents domaines qui touchent à l'élevage. Ces progrès supposent une évolution de la mentalité des praticiens habitués à vivre en autarcie. Cette évolution est déjà commencée et doit normalement se poursuivre pour le plus grand bien de la région.

ZUSAMMENFASSUNG

Beitrag zur agronomischen Erforschung der Gegend von Ancenis.

Der Autor untersucht in agronomischer Hinsicht das Gebiet von Ancenis (Loire Atlantique).

Dieser Landstrich ist durch Geländearten vertreten, welche hauptsächlich den Formationsgruppen des Archaïkums sowie des Paläozoikums (Silur und Karbon) angehören. Dieses Gebiet zeigt nur wenige Erhöhungen. Das Klima ist von ozeanischem Typus : mild und regelmässig feucht. Es handelt sich um ein Gebiet aus kleinen landwirtschaftlichen Familienbetrieben bestehend.

Man unterscheidet vier Hauptarten von Böden :

— sandig-tonige Lehme auf Schieferformationen,

— lehmige Sande auf Grauwacken,

— sandige oder lehmige Sande auf Sandsteine und Konglomerate,

— sandige Lehme auf Glimmerschiefer.

Vom chemischen Standpunkte aus, handelt es sich um leicht saure Böden, mit organischer Materie gut versorgt, und mit normalen biologischen Eigenschaften (mit Ausnahme der degradierten Wiesen). Die Bedürfnisse an Phosphorsäure und Kali sind beträchtlich. Eine Stickstoffdüngung ist unumgänglich.

Aus all diesen Feststellungen ergibt sich, dass die Gegend von Ancenis vor allem als Viehzuchtgebiet in Betracht kommt. Der Bodenanteil welcher der Futterproduktion gewidmet ist (65 %) lässt auf eine Respektierung der Bodenberufung dieses Landstriches schliessen. Jedoch bleiben Verbesserungen zu bewerkstelligen welche die Rentabilität der landwirtschaftlichen Betriebe

zu erhöhen vermögen, indem man zu den, in verschiedenen Gebieten der Viehzucht erzielte rezente Fortschritte greift, und dieselben zur Anwendung gelangen lässt. Solche Fortschritte setzen jedoch bei den Praktikern dieser Gegend, welche in einer gewohnheitsgemäss unabhängigen Wirtschaft leben, eine Entwicklung ihrer Mentalität voraus.

Solche sind bereits eingetreten, jedoch bedürfen sie einer normalen Weiterentwicklung um den Wohlstand dieser Gegend zu fördern.

К агрономическому изучению области Ансенис.

К. БУВАТТЬЕ (Нант).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Автор изучает Ансенис (Атлантическая Луара) с агрономической точки зрения.

Эта область представлена главным образом землями периода аршеенского и периода первичного (силурийского и каменноугольного). Вообще, область мало возвышенная. Климат типа океанского : мягкий и регулярно-влажный. Область характеризуется мелкими хозяйствами семейного типа.

Встречаются четыре главные категории почв :

— Земли на сланцах — песковато-пылевато-глинистые;

— Земли на граувакax — пылевато-песковатые;

— Земли на песчаниках и пудингах — пески или песковато-пылеватые;

— Землы на миковых сланцах — песковато-пылеватые.

С химической точки зрения, земли слабо кислые, хорошо снабжены органическими веществами и их биологические свойства (за исключением деградированных пастбищ) нормальны. Нужда в фосфорной кислоте и в калии велика. Азотные удобрения нужны всегда.

Из этих данных вытекает, что Ансенисская область пригодна прежде всего для скотоводства. Пропорция земель для получения фурража (65 %) позволяет заключить, что в общем естественная пригодность земель принята во внимание. Тем не менее, имеется возможность прогресса в улучшении производительности земель применяя наиболее удачно возможности предложенные новыми методами в различных областях касающихся скотоводства. Этот прогресс возможен при эволюции образа мышления земледельцев, привыкших жить в условиях замкнутого хозяйства. Эта эволюция уже начата и должна нормально развиваться, на пользу области.

SUMMARY

Contribution to the agricultural study of the Ancenis region.

The Ancenis region (Atlantic Loire) consists mainly of lands of the Archaean period and of the Silurian and Carboniferous periods. The region is only slightly elevated and has a mild and regularly humid Oceanic climate. The region comprises mainly small family farms.

There exist four main types of soils :

Siliceous clay-loams on schists,

Siliceous loams on grauwacke,

Siliceous soils or siliceous loams on sandstones, and

Siliceous loams on mica schists.

The soils are slightly acid, well provided with organic matter and possessing normal biological properties (except in degraded prairies). The soils have high phosphorus and potassium requirements, and nitrogen fertilizers are always needed.

The Ancenis region is eminently suitable for animal husbandry, mainly due to the high proportions of soils (65 %) under forrage crops. Nevertheless, the profitability of the enterprises could be improved by a greater use of the possibilities offered by recent research in the field of animal husbandry. This progress, involving a change in the mentality of farmers used to an autarchic life, has already begun and should continue in the interest of the region.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) ANNE (P.). — Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Annales Agronomiques,* p. 161, 1945.

(2) DEMOLON (A.). — Dynamique du sol. Dunod, 5e édition, p. 437.

(3) DEMOLON (A.), BOISCHOT (P.) et LAJON (Melle J.). — Réaction des divers sols à l'apport des engrais phosphatés solubles, son importance dans l'établissement des fumures. *Annales Agronomiques* p. 291, 1953.

(4) GAROLA (G.) et ADIER-EBERHARD (R.). — Le limon en Eure-et-Loir. *Annales Agronomiques,* p. 61, 1954.

(5) JORET (J.) et MALTERRE (H.). — Les sols du Santerre et du Vermandois. *Annales Agronomiques,* p. 165, 1947.

(6) MALTERRE (H.). — Influence des conditions climatiques sur la composition des sols de limon en Picardie. *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture,* p. 296, 1946.

(7) MAZOYER (Melle R.). — Utilisation de la méthode colorimétrique au jaune de titane pour le dosage du magnésium dans les extraits de sols. *Annales Agronomiques,* p. 257, 1953.

631. 435. 3. (44)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES LIMONS DES PLATEAUX DE LA FORÊT DE CHAUX (JURA)

(SOLS A SIMILIGLEY ET MARMOROÏDES)

PAR

G. PLAISANCE
Inspection des Eaux et Forêts,
Dole (Jura)

et

H. W. VAN DER MAREL
Laboratoire de Mécanique des Sols,
Delft (Pays-Bas).

5

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Description d'un profil-type.
II. — Propriétés générales, classification et terminologie.
III. — Genèse des sols à similigley.
IV. — Climat.
V. — Végétation.
VI. — Comportement hydrique, nappe aquifère perchée.
VII. — Marmorisation.
VIII. — Démarmorisation.
Bibliographie.

INTRODUCTION.

Il existe sur certains plateaux résiduels d'épais limons siliceux du début du Quaternaire ; ils donnent des sols qui présentent un aspect très bigarré et un sous-sol extrêmement dur. Ils reposent généralement sur cailloutis, mais n'ont vraiment leurs caractères spécifiques qu'en position horizontale ou subhorizontale, et s'ils sont épais (plus de 1 m par exemple). Dans les cas, au contraire, où le drainage est bon, ce sont, en effet, des « sols bruns » plus ou moins lessivés.

Ces sols sont souvent restés à l'état boisé, parce que peu appréciés des cultivateurs. Les forêts qu'ils portent ont une production jugée insuffisante ; on sait par l'Histoire que leur état de dégradation actuelle provient en partie des abus dont elles ont été victimes ; il reste néanmoins intéressant de rechercher si ces sols sont définitivement infertiles ou si leur production peut être améliorée. La forêt de Chaux est typique, et elle a fait l'objet d'une étude détaillée, écologique, physique, chimique et minéralogique. Mais il existe de nombreuses autres forêts, dans la vallée de la Saône et ailleurs, sur des sols analogues et présentant les mêmes signes de dégradation. On pourra utilement les comparer et exploiter les leçons tirées en forêt de Chaux. Le plan de la Contribution est:

Première partie : Généralités, description, genèse, évolution, terminologie, comportement hydrique, végétation.

Deuxième partie : Analyses physiques, physico-chimiques et chimiques.

Troisième partie : Défauts et amélioration des sols marmoroïdes.

Ultérieurement, dans une IV^o partie séparée, seront étudiés par H. W. Van DER MAREL la composition minéralogique de l'argile et les transformations qui l'ont affectée par suite de la forte altération interne conduisant au similigley.

PREMIÈRE PARTIE

I. — Description d'un profil-type.

1° Une couche supérieure (par exemple 0-15 cm), plus ou moins humifère, meuble et grumeleuse, non altérée par l'eau. Dans les types à hydromorphie la plus accentuée, cette couche devient tourbescente et noire sur 20 cm.

2° Une couche moyenne (30-50 cm) décolorée par lavage assez uniformément en haut, et de façon très irrégulière en bas, d'où un aspect marbré ; il y a des dépôts rouilles, des concrétions brunâtres ou même noires ; la marbrure est floue et le sol de consistance molle : c'est un *similigley*; dans les types les plus altérés, la partie supérieure est gris mastic (décoloration totale) et la partie inférieure fortement marbrée (les marbrures conservant toutefois souvent des contours peu nets).

3° Une couche inférieure (parfois nettement séparée de la deuxième) très *compacte*, extrêmement dure par temps sec, parcourue de très nettes *trainées grises* subverticales sur fond ocre ; ces trainées sont ramifiées, mais diminuent de nombre et d'importance à la partie inférieure.

4° Une couche profonde compacte, mais non veinée, inaltérée.

Certains de ces sols présentent, surtout vers le niveau 30-60 cm

des précipitations rouilles ou noires, ainsi que des concrétions. Parfois les deuxième et troisième couches sont fondues en une seule.

Des variantes nombreuses peuvent être observées suivant les aspects et proportions des zones oxydées et réduites : parties décolorées en « flammes » dans un matériel ocre, ou au contraire plages rouilles sur un fond décoloré ; stratification subhorizontale des lits décolorés en profondeur ; plafond de la couche marmoroïde plus ou moins élevé (donc épaisseur de la couche ocre inaltérée plus ou moins grande) ; sous-sol profond (« couche-support ») plus ou moins induré.

En forêt de Chaux ces sols forment souvent des *chaines* du genre de celle représentée par la figure I ; les degrés d'altération y sont surtout fonction de la position topographique ; sur la figure on voit aussi les liens qui les unissent aux autres sols de cette forêt, sols bruns des pentes et sols caillouteux.

Ces sols altérés couvrent environ 80 p. 100 de la surface de la forêt, soit 16.000 Ha : on voit donc l'intérêt de leur étude (fig. 2).

II. — Propriétés générales, classification et terminologie.

Ce sont des sols compacts, plastiques en hiver, secs et durs en été.

La forêt était primitivement de hêtre et chêne. Par suite des traitements anciens elle est actuellement peuplée surtout en chêne (rouvre et pédonculé). Elle est très irrégulière, montrant à côté de beaux peuplements, des vides et clairières dont la production est notoirement insuffisante. Ces sols ont pour caractéristiques essentielles :

1° La dominance de constituants fins (5 à 200 microns) et surtout 5 à 20 microns) ; ils sont battants et très compacts ; leur structure fragile souvent affaissée.

2° Leur pauvreté en substances fertilisantes.

Ils ont été peu étudiés en France jusqu'ici. Pourtant à l'étranger surtout en Allemagne, les pédologues ont déjà employé de nombreuses dénominations qui correspondent soit à des types différents, soit aux mêmes types observés dans des régions différentes. Il faut en tout cas les distinguer des vrais *gleys* (*Eugley*) décrits déjà Wyssotzki, en 1905, puis par Kubiena en 1953, qui résultent de nappes quasi-permanentes avec alimentation latérale, auxquels se rattachent les *Syrogleys*, *Klinogleys*, *Microgleys*.

Parmi les sols (sur lehm, grès argileux, moraine, etc...) qui résultent de nappes *perchées à éclipses*, formée d'eau de pluie *locale* arrêtée par une couche-écran, on a décrit :

1° Des *Stagnogley* où l'effet de l'eau est quasi-permanent (Vogel 1953, Mückenhausen 1958).

2° Des sols où l'action est intermittente, parfois brève au total :

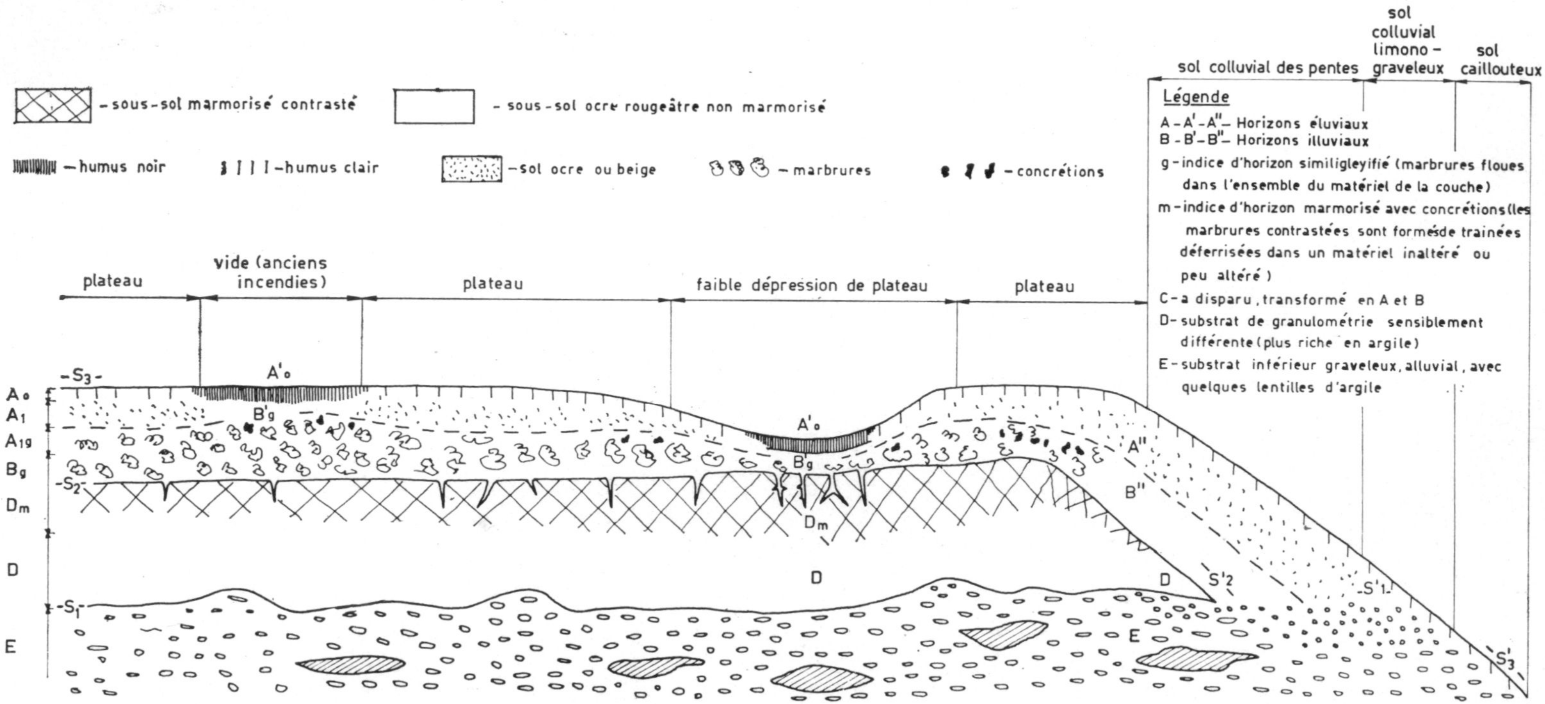


FIG. 1. — Coupe en travers d'un plateau de la forêt de Chaux : chaîne de sols.

La figure montre la répartition des sols : 1° sol caillouteux du substratum affleurant seulement sur certaines pentes. 2° sol brun des pentes, bien drainé. 3° Sol de plateau avec similigley et sous-sol marmorisé, les variantes plus mauvaises, sont indiquées à l'emplacement des vides et des faibles dépressions de plateaux. Il est possible que la surface supérieure de E conserve, fossilisé, un ancien relief pliocène S_1 S'_1. De même pour la surface supérieure de D qui conserverait, fossilisé, un ancien relief périglaciaire S_2 S'_2. Le relief actuel S_3 S'_3 est formé du résidu du glacis primitif recouvert de limons tardifs, et, sur les pentes, d'éléments non encore marmorisés (par suite de leur position de pente) ou colluviaux démarmorisés.

Sol bigarré (DAUBRÉE, 1852). *Terre bigarrée et striée* (TREITZ, 1912). Molkendoben (RAMANN, 1908), (GRUPE, 1909-1923), (VOGEL, 1914), (LINSTOW), (sur grès bigarré mélangé de lœss..., de l'Allemagne moyenne). *Missenboden* (RAMANN, 1908 ; Forêt noire). *Nasse Waldböden* (Terme assez vague). *Gleyartige Böden* : sols gleyiformes (KRAUSS, 1928, KRAUSS et HARTEL, 1903, KRAUSS et al., 1939, SCHNEIDER, 1949), qui correspondent aux stades d'altération les moins poussés. *Marmorierte Böden* (LAATSCH, 1937). *Sols marmorisés*. *Pseudogley* (nom qui est actuellement le plus usité) (KRAUSS, 1928, SCHNEIDER, 1949, ZAKOSEK, 1952. HABIG, 1953, KUBIENA, 1953, MUCKENHAUSEN, 1950, 1952, 1953, 1954, 1958, ZAKOSEK 1954, LANGNER, 1956) et ses variantes : Pseudogley-Braunerde ; Braunerde-Pseudogley, Podsol-Pseudogley ; Pseudovergleyte Böden ; Molkengleys ; Marbled pseudogleys (KUBIENA 1953) ; Muldengleys, Halbgleys, Staunassegleys — *Paragley*, mot très satisfaisant proposé par MANIL — *Sols à sous-sol marmoroïde* (PLAISANCE, 1953), et à *similigley* (1) (PLAISANCE 1956) — *Opok Boden* (Jaklitsch, Autriche 1956) — Des sols voisins sont : *Gleypodzols* : (Frosterus 1912, HARTMANN, 1952), pour ceux qui montrent des désintégrations podzoliques — *Planosol* (États-Unis, en particulier Smith, 1941) — *Low humic gley*, *Sols à frapigan* (sous-sol induré) (Soil Survey Manual 1937, M. G. Cline...) — *Surface water gley soils* (CLARKE, 1957) — *Sols semi-tourbeux*.

De même les *Fliesserde*, *Flottlehm*, *Kleibsandsböden*, *Melmböden*. Les *merzags* du Maroc qui ont été décrits par BRYSSINE. Ils appartiennent aux *Sols Hydromorphes* de AUBERT, mais les actions hydromorphiques y sont intermittentes — *Sols amphibiques* (Mohr) ou *semi-subhydriques* (Van der Marel, 1948) sous climat de l'Indonésie.

On pourrait dire *Sols hydrogéniques*.

On devine qu'il règne une certaine confusion parmi tous ces termes ; pour la lever, il faudra encore beaucoup de descriptions monographiques et d'échanges de vues.

La variété des types observés provient de la variété des roches-mères (plus ou moins imperméables, plus ou moins riches en cations), de la variété des climats (les types les plus accusés se trouvent sous des climats plus pluvieux).

Les faciès varient suivant qu'il y a un effet permanent ou quasi-permanent de l'eau (*Eugley*), très fréquent (*Stagnogley*), peu fréquent (*Pseudogley*).

(1) Nous avions l'habitude de désigner ces sols par l'expression *sols à similigley*. Il apparait maintenant qu'elle a le même sens que celle de *sols à pseudogley* des auteurs allemands. Nous estimons qu'elle convient plutôt aux marbrures floues et qu'il conviendrait de réserver le mot de marmoroïde aux aspects les plus contrastés. *Marmoroïde* « qui ressemble à du marbre » est plus exact, mais moins simple que *marbré*, employé souvent à sa place ; il est synonyme de *marmorisé* des auteurs belges. En réalité il y a tous les intermédiaires entre les couches faiblement tachetées et celles très fortement marbrées, en passant par les similigleys et les faiblements marbrés. Il serait opportun qu'une terminologie précise soit adoptée à l'avenir.

On désigne les horizons affectés (surtout en Allemagne) par le symbole g ou encore par P.

Les sols à similigley sont plus répandus qu'on ne le pense communément. Depuis une époque récente on s'intéresse de plus en plus à ce type de sol mal connu jusqu'ici, caractérisé par une action de l'eau interne intermittente plus ou moins cyclique, s'exerçant dans des certaines parties plutôt que dans la masse.

III. — Genèse des sols a similigley.

Il est probable que la couche inférieure est très anciennement compacifiée, (c'est un *vieux sol*) et que les couches supérieures et moyennes résultent d'un apport postérieur (parfois éolien, ou diluvien, ou mixte).

La couche supérieure est plus meuble du fait qu'elle est soumise aux vicissitudes atmosphériques (alternances de sécheresse et d'humidité, de gel et dégel), qu'elle est divisée par les racines et petits animaux et qu'elle est enrichie en humus.

La couche moyenne prend un aspect bigarré par suite de la stagnation de l'eau sur la couche compacte imperméable qui la soutient et qui forme « plancher ». Ce phénomène qui se poursuit de nos jours s'est produit anciennement : ce sont des paléosols, plus précisément des « sols hérités » (GEZE, 1959).

Quant à la couche inférieure, elle a subi des vicissitudes sous des climats anciens très différents de l'actuel, probablement des gonflements, d'où le durcissement par cimentation, et des rétractions, d'où la réticulation en polygones. Les grands froids et les grandes sécheresses ont eu des effets comparables.

Il est également possible — ce qui n'est d'ailleurs pas incompatible — que les tannins des bruyères et des feuilles de chêne aient agi puissamment pour déclancher ou accroître le processus de marmorisation (LATSCH, 1937).

On s'est demandé quelle était la part du lessivage (dont le coefficient est d'environ 1/2) : l'argile a favorisé la marmorisation vers 30 à 50 cm puisqu'il y a eu colmatage des interstices entre des agrégats existants primitivement donc augmentation de l'imperméabilité. Mais le phénomène majeur reste la *compacification d'origine ancienne,* d'où résultent les phénomènes secondaires de stagnation interne de l'eau.

La marmorisation a été *accrue* par le découvert excessif.

En somme la couche offerte aux racines est une couche contestée entre deux influences opposées : celles remontantes de l'altération par l'eau accumulée, celles descendantes et améliorantes dues aux actions de l'oxygène atmosphérique, des variations climatiques et de la végétation. A un moment donné du temps, la limite se trouve à un certain niveau qui

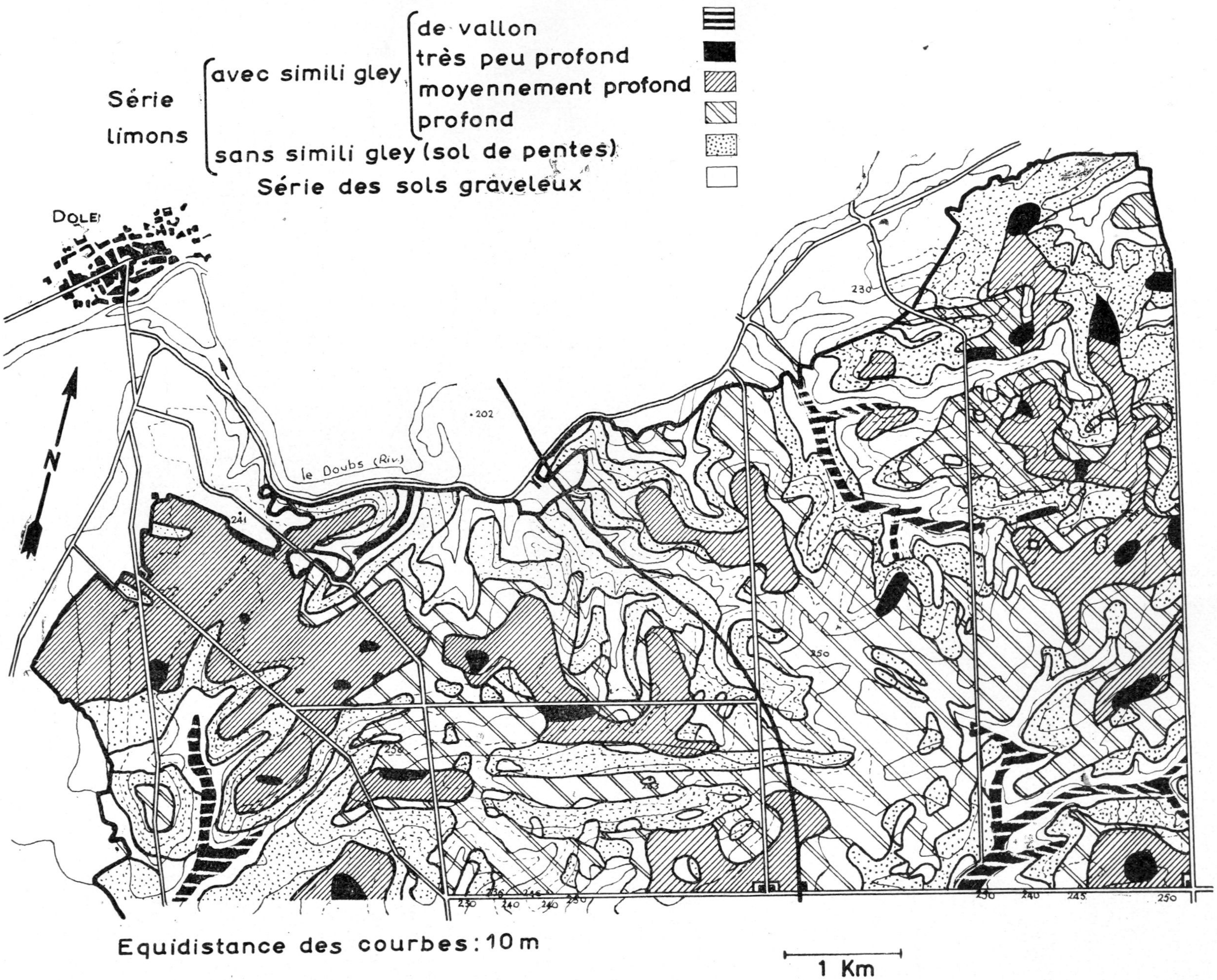


FIG. 2. — Carte pédologique de la forêt de chaux (Partie N. O.)

La carte des sols de la région Nord-Ouest de la forêt de Chaux montre la répartition en plan des sols : 1° Sol graveleux des versants : dans cette partie de la forêt, ils sont assez étendus car le relief est très accidenté. 2° Sol brun des pentes. 3° Sol à similigley plus ou moins profond sur les plateaux (en hachures) avec la variante de mauvais sol à similigley superficiel sur certaines parties. 4° Sol de fonds de vallon.

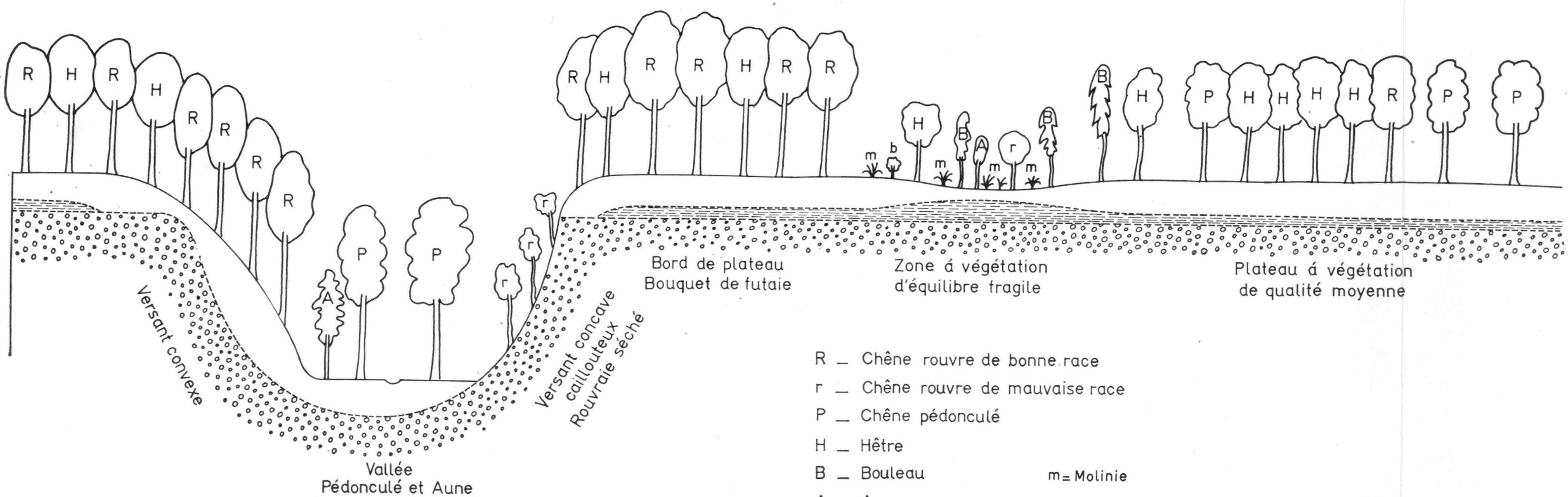


FIG. 3. — Répartition schématique des sols et des Peuplements
La végétation, dans ses grandes lignes, est liée étroitement au sol. Celle des plateaux est de qualité moyenne, celle des vides à similigley peu profond est claire et rabougrie, celle des sols bruns profonds est de belle venue (futaie de chêne rouvre et hêtre), celle des pentes caillouteuses est mal venante, celle des fonds de vallon est assez élancée.

correspond à un équilibre provisoire. Mais cet équilibre peut être détruit et la limite peut remonter (dégradation) ou redescendre (restauration).

L'étude des sols de la forêt de Chaux a permis de mettre en évidence l'importance du *lessivage latéral*. Il s'exerce même sur les plateaux à très faible pente par suite de l'écoulement extrêmement lent de l'eau de pluie sur la couche imperméable du sous-sol.

Cette eau disparait par suintement ou évaporation dans les couches meubles des pentes. Elle laisse des dépôts internes et concrétions bien souvent remarquées en abondance au bord des plateaux (effet du lessivage latéral).

IV. — Climat.

Le climat est à tendances continentales. Pluie : environ 1 000 mm par an. Température moyenne annuelle : 9^o5 (janvier 0^o2, juillet 19^o1). Pluies assez également réparties, avec maximum en été (104 mm en juin) et en automne (164 mm en novembre).

Les maxima de pluie, générateurs d'engorgements, se produisent en novembre. Le climat n'a pas d'effet podzolisant sur ce sol en raison de sa compacité et du taux relativement faible des pluies hivernales. Au contraire il semble favorable à la marmorisation, surtout les années où abondent les pluies de printemps, d'automne ou d'hiver. Pluies et aridités mensuelles (moyenne de 5 années) calculée par la formule :

$$I_m = \frac{P \times 12}{T + 10}$$

où P est la pluviosité du mois en mm, et T la température moyenne en degrés centigrades.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pluie (mm) ...	70	78	63	76	63	104	62	109	89	71	164	63
Aridité relative mensuelle.....	58	54	47	31	27	42	28	47	42	38	95	60

Il y a dommage au sol lorsque cet indice dépasse 50.

V. — Végétation — (fig. 3).

Actuellement en forêt de Chaux ces sols sont occupés par un taillis sous futaie en conversion. La réserve est formée de chêne 80 p. 100 (rouvre 5/10, pédonculé 4/10, hybride 1/10), hêtre 10 p. 100, divers 10 p. 100.

Le rouvre, grâce à ses racines superficielles, supporte ces sols dont la profondeur utile est faible ; le pédonculé se trouve dans les vallons, mais aussi dans les anciens vides reconquis.

Le taillis est formé de charme (limité aux sols à marbrures assez pro-

fondes, c'est-à-dire à plus de 40 cm), de coudrier (plus tolérant), de tremble, hêtre, chêne (en régression depuis que le couvert a augmenté).

A côté de beaux bouquets riches en futaies assez élancées sur les sols les meilleurs (les moins marmorisés) il y a des étendues clairiérées et même des vides à molinie (*Molinia caerulea, Salix aurita, Rhamnus frangula*). Ces vides sont d'ailleurs en voie de résorption par étranglement ; certains sont envahis par le bouleau (qui fait figure de pionnier), surtout après incendie.

Les traumatismes subis par cette forêt (exploitation en taillis, découvert excessif, pâturage, exportation de litière et surtout incendies répétés...) expliquent en grande partie les dégradations locales qui l'affectent encore aujourd'hui.

Heureusement, dès 1956, a été décidée la *conversion en futaie* qui jouera le rôle précisé plus loin.

Caractères de cette végétation

1° Par suite de la compacité du sous-sol et du plan d'eau hivernal les racines des arbres s'étalent ; la majeure partie de l'enracinement reste superficielle, donc au-dessus de la couche suffisamment humide en période sèche ; le houppier s'en ressent, il est plus étalé ; le fût de l'arbre est court. Les racines ne sont pas dans la couche fraîche en été, saison de croissance.

2° Dans la couche où se développent des racines, tant par suite de l'asphyxie périodique, due à l'engorgement printanier, que par suite de la sécheresse physiologique estivale d'un sol trop tassé, ce développement est insuffisant et défectueux ; les arbres sont moins vigoureux ; les accroissements en longueur sont plus faibles, les branches sont tordues. On sait que l'appareil externe d'un arbre reproduit en gros l'appareil interne dont le développement, ici, est contrarié.

En raison de cette insuffisance et de cette situation trop élevée du système radiculaire, les chênes ont parfois le port *en pommier* ; en tout cas ils n'ont pas le port élancé qu'ils auraient sur sol sain et fertile.

3° Les bois sont fréquemment *gelivés*, (tissus insuffisamment cohérents quand agit le froid et le dégel) ; ils sont *roulés* car ils sont mal enracinés, donc mal ancrés au sol lorsqu'il y a des sautes de vent, à tissus plus fragiles, ils ont de ce fait des contreforts et un élargissement du bas du tronc.

4° La *molinie* est la graminée qui possède la curieuse propriété d'aimer la lumière et de prospérer d'autant mieux que les conditions hydriques alternantes sont plus accusées (ennoyage hivernal et dessiccation excessive estivale) ; dès qu'il y a découvert (éclairement supérieur à 2 p. 100) elle s'installe.



Photo 1. — Sol à similigley, coupe verticale. On distingue la couche supérieure grumeleuse avec racines, la couche moyenne fortement délavée, la couche avec marbrures serrées (trainées subhorizontales) ; la couche profonde avec trainées blanchâtres espacées. La molinie est bien visible au 1er plan sur le bord du fossé et en haut de la photographie de l'autre côté du fossé (au-dessus de la coupe de sol).

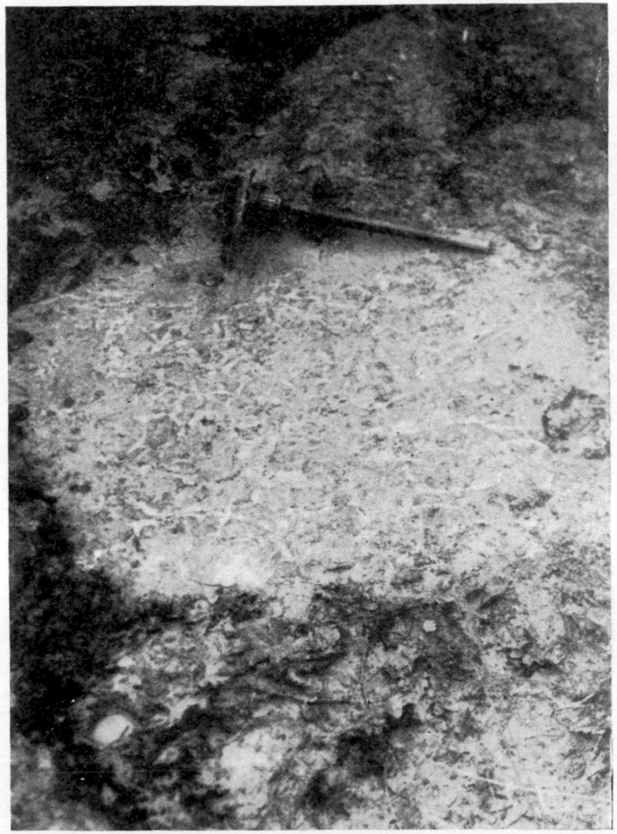


Photo 2. — Sous-sol marbré : coupe horizontale. La photographie a été prise obliquement ; on distingue les polygones cernés par des bandes gris-blanchâtres, et à contours irréguliers. Ils résultent des phénomènes de réduction à la périphérie des racines vivantes, à la place des racines mortes et sur les parois les fentes de dessication.

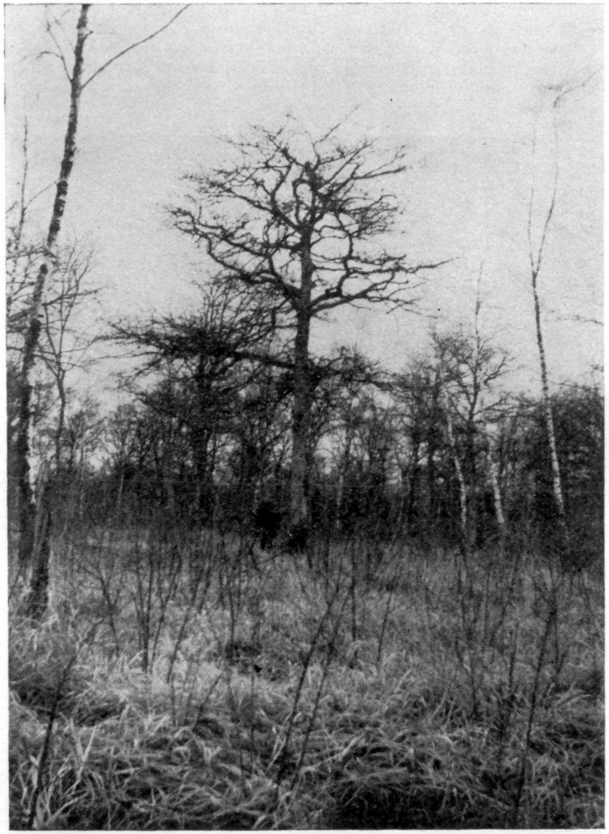


Photo 3. — Vide à molinie: La molinie et la bourdaine ont envahi la zone dégradée. La cime du chêne montre les phénomènes de rabougrissement en rapport avec le système radiculaire insuffisant de l'arbre. A droite et à gauche, des bouleaux ont envahi le terrain.

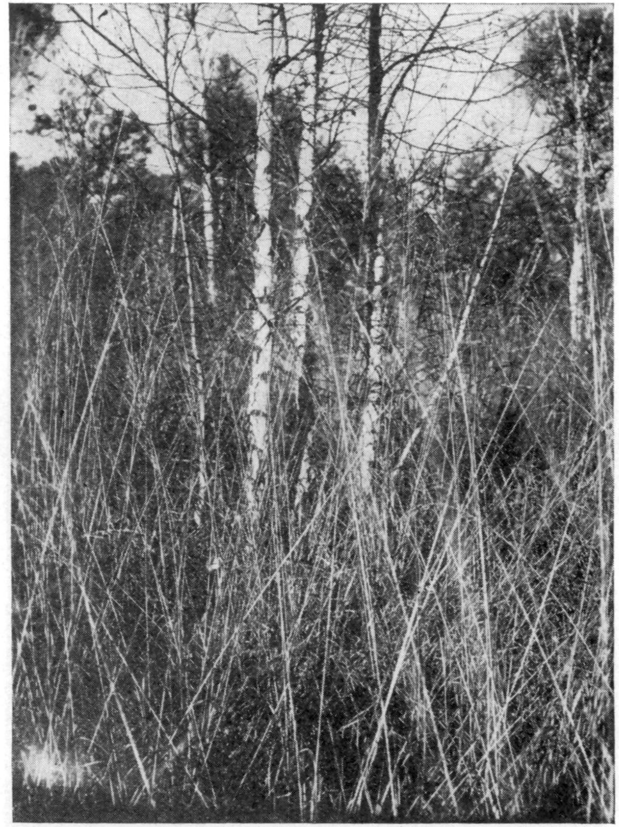


Photo 4 : Dans un vide de 1/14 dont le sol est dégradé : La molinie est exubérante et le bouleau est la seule essence qui, pour le moment, occupe ce sol.

5° Quelle que soit l'explication proposée, un fait est certain ; la molinie a une action très nocive ; dans les clairières qu'elle a envahies la régénération se fait à un rythme réduit, surtout dans celles où son installation est la plus ancienne (molinie en *touradons*).

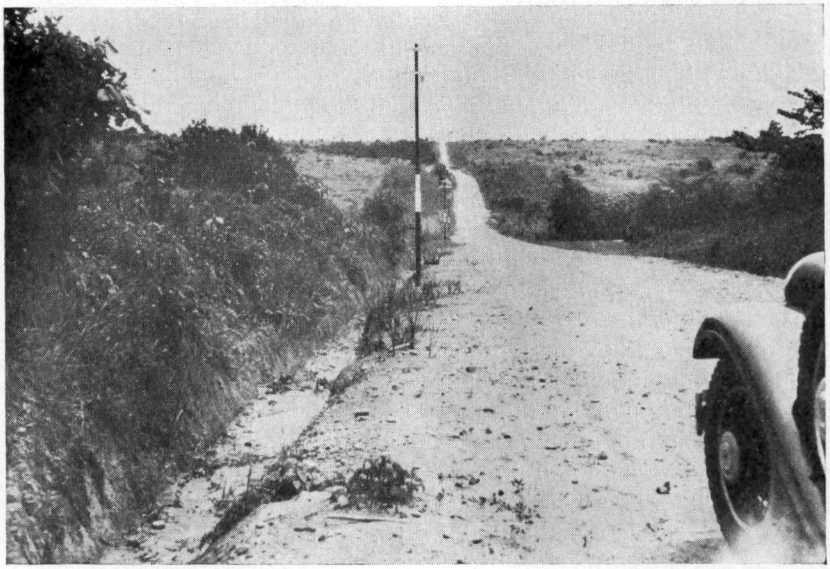


Photo 5. — Sumatra : grande étendue autrefois boisée à sol dégradé après déboisement.

Elle est à la fois test et cause de conditions défavorables qui se répercutent sur la régénération, sur la croissance des arbres et la qualité du bois.

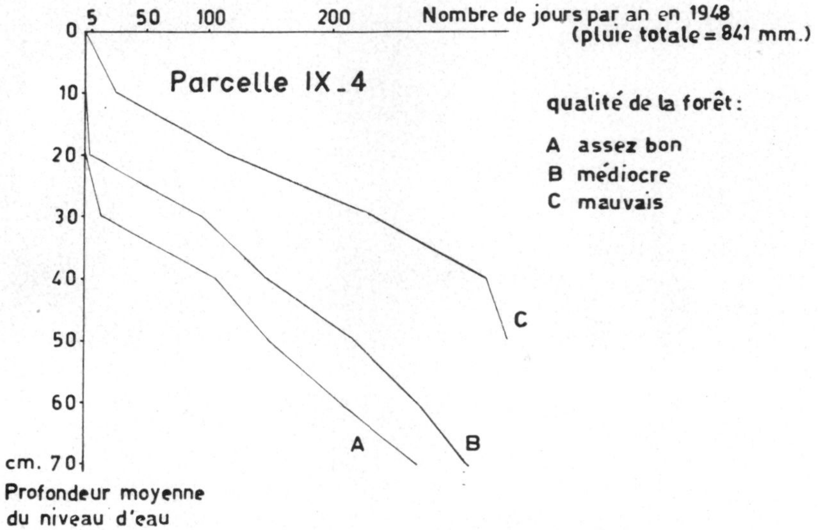
VI. — Comportement hydrique — (fig. 4, 5, 6).

Ces sols sont caractérisés essentiellement par la présence intermittente, non loin de la surface, par exemple entre 15 et 40 cm (exceptionnellement 5 cm et 30 cm), d'une *nappe aquifère perchée* (couche saturée) (Plaisance, 1956). Elle est formée exclusivement d'eaux de pluie ; elle a une épaisseur incessamment variable, grossissant après chaque pluie, diminuant à chaque période chaude et sèche, variant également au moment des gelées.

Après chaque période pluvieuse le niveau remonte rapidement, par exemple de 10 cm pour une pluie de 1 cm ; il redescend après chaque période chaude et sèche, surtout si les arbres feuillus sont en végétation et transpirent ; cette descente se fait assez lentement : il y a *accumulation* et *variations* incessantes.

Soient P : chute de pluie en millimètres — T : température en degrés — E : évaporation en millimètres — N : nombre de jours ; la table d'eau est étroitement liée au facteur de Lang $= \frac{P}{T}$, à l'indice d'aridité de la période Ip $= \frac{T + 10}{P} \times \frac{365}{N}$ et à P — E.

Elle n'atteint jamais la surface, mais se limite à un niveau maximum correspondant au minimum d'évaporation réalisable sous le climat local, et avec la granulométrie du profil considéré. On constate, en général, que les montées, après les pluies, se font rapidement, et les descentes plus lentement, surtout en hiver.



FIF. 4. — Profondeur moyenne du niveau d'eau et qualité de la forêt.

Le nombre de jours d'une année complète où la couche aquifère perchée atteint un certain niveau varie suivant le sol et le peuplement ; A, B, C sont 3 points voisins de la même parcelle IX/4 ; sur la placette dégradée C le nombre de jours où le niveau est élevé est plus grand que pour les placettes B et A.

Les remontées sont toujours relativement fortes pour de faibles chutes de pluie, et ceci d'autant plus que la porosité est plus faible ; c'est aisément compréhensible : l'eau remplit la fraction des pores disponibles ; considérons un sol qui a une porosité de 40 p. 100 ; s'il est « sec en place », il ne contient plus que 7 p. 100 d'eau (rapportée au poids de matière sèche) ; reste disponible environ 28 p. 100 du volume des vides ; une pluie de 1 mm sature une hauteur de $\frac{100}{28} = 3,5$ mm de sol. Pour que le niveau d'eau s'élève de 35 cm (couche support) à 20 cm, soit 150 mm, il faut une pluie totale de $\frac{150}{3,5} = 42$ mm ; de telles pluies surviennent

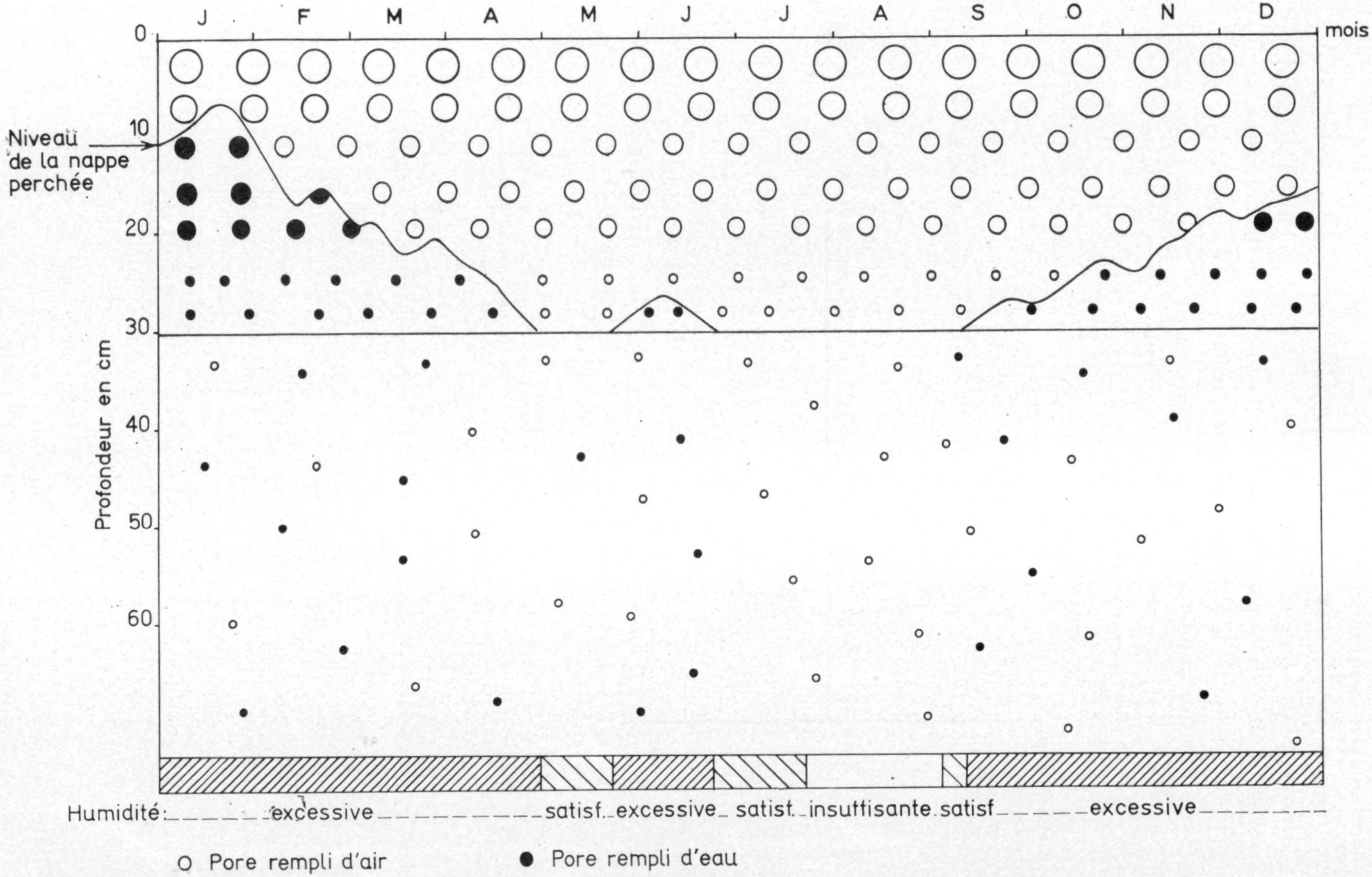


FIG. 5. — État hydrique du sol (une année).

La figure indique schématiquement pour les 12 mois d'une année entière la teneur en eau du sol. Quand il y a nappe perchée, en particulier en hiver, une certaine épaisseur est gorgée d'eau l'humidité est excessive. Au-dessus de la nappe elle est normale, elle peut même devenir insuffisante au cœur de l'été ; en profondeur, en dessous de 30 à 40 cm, l'humidité utile est toujours insuffisante. L'humidité utile (occupant partiellement certains pores et tapissant les parois) n'a pas été figurée sur le croquis.

parfois ; plus généralement le même résultat est réalisé par 3 ou 4 fortes pluies successives rapprochées.

La fréquence et les durées partielles (et totales) des éclipses de cette nappe intermittente dépendent de la pente locale, du couvert végétal, de la cadence et de l'abondance des pluies, des valeurs de la température ; elle dépend aussi du degré d'imperméabilité de la couche-support, de son éloignement plus ou moins grand de la surface.

Le nombre des jours de stagnation au-dessus de la couche support varie chaque année ; par exemple pour l'un de ces sols le niveau d'eau

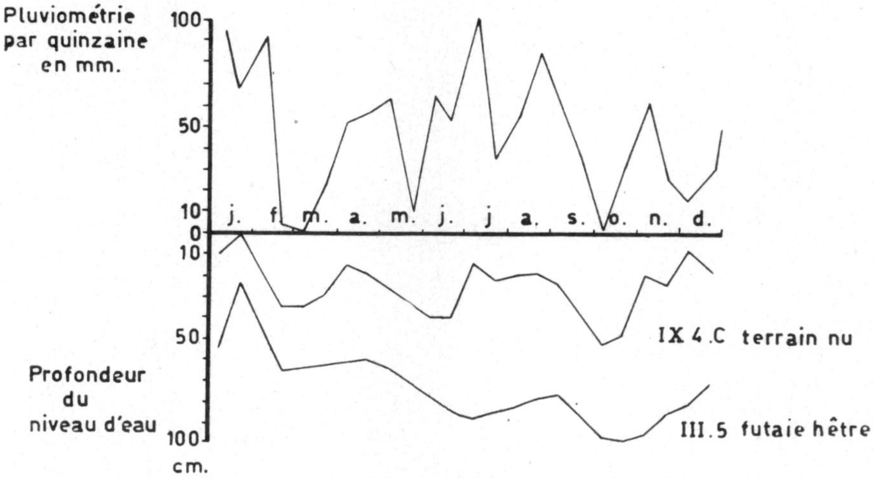


FIG. 6. — Pluviosité et profondeur du niveau d'eau pour terrain nu et pour futaie hêtre.

La figure montre que la profondeur des niveaux d'eau est en relation étroite avec la chute de pluie des jours qui ont précédé les mesures du niveau ; mais le résultat est très différent suivant qu'il s'agit d'un terrain nu (niveau d'eau élevé) ou d'une futaie de hêtre complète et serrée (niveau profond).

montait jusqu'à 20 cm en année sèche pendant 18 jours, et en année pluvieuse pendant 74 jours.

	Nombre de jours Bon sol	Nombre de jours Mauvais sol
	—	—
Niveaux constatés à 20 cm........	0	86
Niveaux constatés à 30 cm........	14	205

Si l'on compare les niveaux d'eau d'une même année, on trouve par exemple :

Cette *nappe à éclipses* a pour effet de constituer temporairement entre la couche supérieure grumeleuse, aérée, de bonne activité biologique, et le sous-sol un écran, empêchant les influences bénéfiques de descendre et de rendre fertile le sous-sol. Elle arrête les racines et la microflore, par suite des *conditions asphyxiantes* qu'elle comporte.

VII. — Marmorisation.

Dans la couche où elle naît et subsiste, l'eau provoque :

1° *un affaissement de la structure*, un tassement interne funeste, qui diminue les ressources en eau disponibles pour les arbres, par suite de la diminution de la surface interne ;

2° *la réduction des oxydes* de fer et manganèse, et par voie de conséquence les *migrations* à courte distance des complexes organométalliques par suite des mouvements de l'eau chargée de matière organique : ces migrations ont lieu en haut dans toute la masse, en bas suivant certains tracés (surfaces des racines qui libèrent les ions H^+, emplacements des anciennes racines, et fissures par lesquels se fait la descente de l'eau et peut-être de faibles remontées des produits dissous).

Lors des dessications ultérieures, ces précipitations se forment par *micropodzolisation* en certains endroits mieux oxygénés ou moins acides ; d'où des zones brunâtres contrastant avec les zones décolorées par déferrisation et l'aspect marbré de l'ensemble ; d'où également des plages et concrétions noirâtres plus ou moins géométriques, irrégulières, hétérogènes.

Les concrétions les plus dures sont probablement des concrétions produites lors de dessications plus brutales, généralement plus anciennes.

Dans les parties hautes du profil où l'eau ne séjourne pas, on trouve des taches de rouille et de petites précipitations friables, dues à des remontées capillaires récentes.

Des bactéries interviennent d'ailleurs dans ces processus (ELLIS, 1919, ROBERT, 1947).

On comprend que cette marmorisation soit plus forte :

1° si le climat est plus pluvieux, mais surtout si les pluies ont un maximum hivernal ou printanier et si au contraire il y a des périodes sèches intercalées ;

2° si le sol est plus proche de l'horizontale et si le plateau est très étendu ;

3° si le découvert est plus marqué et plus continu (coupes fortes, enlèvement des débris d'exploitation, de la litière),

4° si les essences sont plus riches en tannin (chêne), ou probablement aussi, en substances donnant des acides ;

5° s'il y a tassement par piétinement, roulage... ou autre cause diminuant la perméabilité.

C'est un phénomène relativement rapide (quelques mois ou quelques années), mais il est difficile de distinguer dans une marmorisation ce qui est ancien et ce qui est actuel.

Cette marmorisation floue, plus ou moins intense, peut affecter aussi

bien un sol brun uniforme qu'un sol lessivé ou un sol podzolique ; il y a superposition de la marmorisation au lessivage.

En résumé le comportement hydrique des sols à similigley est caractérisé par :

1° une nappe perchée et formée d'eau de pluie,

2° des alternances de conditions extrêmes au point de vue des teneurs en eau,

3° un remaniement à l'intérieur d'un même horizon des sels de Fe et Mn ; faible lessivage vertical (ou un lessivage antérieur à la similigleyification), fort lessivage latéral (sur très faible pente).

Ces sols sont assurément très divers, mais ils sont à distinguer nettement des sols à nappe constante alimentée latéralement, et des sols sujets à submersion, eux aussi sous la dominance de l'eau.

VIII. — Démarmorisation.

Elle consiste en restructuration poreuse, oxydation et rediffusion plus égale du fer et manganèse.

Il est malheureusement certain que la simple aération par ouverture de fossés ne suffit pas : un essai de plusieurs années l'a montré.

Pour que se constituent à partir du matériau marmoroïde des agrégats juxtaposés il faut nécessairement des alternances d'humectation et de dessication provoquant des dilatations et contractions ; elle exige nécessairement un agent de liaison, habituellement la matière organique ; cette matière organique pénètre dans le sol et tapisse les particules minérales agglomérées. Elle exige des interventions biotiques.

La conséquence est une structure érigée et plus résistante à la compression mécanique ou à l'action de l'eau. Des grumeaux apparaissent. L'aération est nettement meilleure, l'activité biologique plus grande. Les racines circulent plus facilement.

Quant à la rediffusion du fer, elle ne peut se faire lorsqu'il s'agit de concrétions très dures : celles-ci subsistent. Mais elle se fait à partir des zones riches en fer et en manganèse non concrétionné ou en concrétions friables. Les parties blanchies s'oxydent et brunissent.

La démarmorisation se produit en particulier sur les parois de fossé, sur les monticules artificiels, les buttes de chablis... Elle est facilitée :

1° par une succession d'années sèches,

2° par l'assainissement,

3° par le fouissement opéré par les racines qui divisent et soulèvent le sol,

4° par le brassage et l'enrichissement en matière organique dus aux animalcules,

5° par l'incorporation de matières organiques à bonne décomposition.

C'est en tout cas un phénomène relativement lent (plusieurs dizaines d'années).

En quelques mois ou un petit nombre d'années la remarmorisation peut se faire ; elle est certainement beaucoup plus rapide que le phénomène inverse, la démarmorisation ; ce n'est pas étonnant ; n'est-ce pas une loi de la nature qui est plus aisé de détruire que de construire.

En résumé, la marmorisation correspond à un ensemble de phénomènes, les uns irréversibles, donc sans remèdes, les autres réversibles, donc remédiables. C'est ce qui fera l'objet de la III[e] partie.

Résultats et conclusion.

Cette I[ère] partie à décrit surtout des *observations faites sur le terrain* :

1° Les sols de la forêt de Chaux montrent de façon accentuée certains caractères mal étudiés jusqu'ici. On pourra étendre à d'autres sols moins fortement marmorisés les résultats obtenus ici, en interprétant.

2° Les propriétés hydriques y montrent une *alternance* très nette, et très forte. Il serait faux de parler de sols « trop humides », à plan d'eau (ce qui est vrai en hiver) ou « trop secs » (ce qui est vrai en été) : les *oscillations* hydriques sont justement leur caractéristique.

3° Ils sont susceptibles de se modifier énormément suivant les conditions de drainage dans lesquels ils se trouvent placés (on verra plus loin l'évolution du sol primitivement marmorisé en position de monticule) et suivant la végétation qui les couvre : ce qui est pressenti par l'observation sera confirmé et précisé par les analyses.

4° Les sols ont été profondément altérés ; on a parlé de « désintégration » (1) : il est donc apparu nécessaire de préciser en quoi consiste cette « démolition interne », quel est le degré de pauvreté qui en résulte.

5° Il était utile de préciser les différences entre les horizons de surface et les sous-sols correspondants plus argileux.

6° Sous molinie le sol est souvent, dans les mêmes conditions climatiques, plus humide, mais cette humidité ne semble pas favorable à la végétation, elle semble non utilisable.

D'autre part, les incendies et le traitement en taillis perturbant profondément le manteau végétal ont créé des conditions nouvelles : on a été amené à se demander quelles étaient les différences des propriétés réelles dues au découvert fréquent ainsi provoqué, si ces propriétés mauvaises étaient durables ou non lorsque le couvert était refermé (naturelle-

(1) *Désintégration:* décomposition physique et chimique des minéraux constituants sous l'action de divers facteurs, y compris la formation de minéraux secondaires, synonyme de *Weathering*, *Verwitterung*.

ment ou artificiellement) : d'où l'idée de faire des mesures précises permettant de comparer les sols réputés « bons » et ceux réputés « mauvais ». Les analyses ainsi suscitées font l'objet de la IIe partie de la Contribution. Elles permettront de confirmer, préciser, compléter, expliquer les comportements ci-dessus exposés des sols à similigley.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARENS (R.). KRÄMER (F.) et LANGNER (Ch.). — Ueber die Bodenstruktur der Wasserhaushalt und die Ertragsfähigkeit von Pseudogleyen und gleyartigen Braunerden. *Zeitschr. Acker und Pflanzenbau*, **107**, 67-98, 1958.

BLOOMFIELS (C.). — The possible significance of polyphenols in soil formation. *J. Sci. Food. Agricult.*, **8**, 389-392, 1957.

CARLISLE (F. J.). — Characteristics of soils with fragipans in a Podzol region, Ph. D. Thesis Cornell University Ithaca, N. Y., 1954.

CARLISLE (F. J.) KNOX (E. G.) and GROSSMANN (R. B.). — Frapigan horizons in New-York soil S. S. S. A., p. 21, 1957, 320-330, 1958.

DUCHAUFOUR (P.). — Les sols à horizon de gley. *Rev. des Eaux et Forêts*, p. 357, 1949.

DUCHAUFOUR (P.). — Précis de pédologie, Masson et Cie, Paris, 276-287, 336, 1960.

ELLIS (D.). — Iron bacteria — *Mineral Magaz.*, **23**, 1919.

FRANZ (H.). — Feldbodenkunde. Vienne, p. 311-317 et 248-249, 1960.

GALOUX (A.). — Le hêtre et la dégradation des sols forestiers lœssiques B. S. R. F. Belgique, mai, 228-230, 1953.

GRUPP (O.). — Zur Entstehung des Molkenbodens. *Internatl. Mitt. Bodenk.*, **13**, 99, 1923.

HABIG (F.). — Beitrag zur Dynamik und Genetik Stauwasserbeeinfluszter Böden. Thesis Han-Münden, 1953.

HARTMANN. — Forstökologie. Vienne, 1952.

HORNBERGER (R.). — Molkenboden. *Int. Mitl. Bodenk*, **3**, 353-357, 1913.

JAKLITSCH (L.). — Untersuchnung von Aulehmböden der Osteiermark. *G. W. i. M. o. b. G.*, **3**, p. 15-30, 1955.

KRAUSS (G.). — Die sogenannten Bodenerkrankungen. *Jahresb. d. Deutschen Forstvereins*, 121-133, 1928.

KRAUSS (G.) et HÄRTEL (F.). — Bodenarten und Bodentypen in Sachsen. *Forstl. Jb.* **81**, 131, 1930.

KRAUSS (G.) HÄRTEL (F.) MÜLLER (K.) GÄRTNER (G.) et (H.) SCHANZ. — Standortsgemäsze Durchführung der Abkehr von der Fichten wirtschaft im Nord West Sachs. *Niederland Thar. Forstl.* Jb 90, Heft 719, 1939.

KUBIENA. — The soils of Europe. Th. Murby a Cy, London, 317 Pages, 1953.

LAATSCH (W.). — Die gerbsauren Zerstörung nasser Eichenwaldböden. *Kolloïd Beih*, **46**, 215, 1937.

LAATSCH (W.). — Dynamik der Deutschen Acker und Waldböden. Theod. Steinkopff, Dresden und Leipzig, 1938.

LAATSCH (W.). — Dynamik des mitteleuropäischen Mineralbodens. Theod. Steinkopff, Dresden und Leipzig, 1957.

LACHAUSSÉE (E.). — Les sols sous la dominance de l'eau et la forêt. REF 5, p. 246-273, 1950.

MOHR (E. C. J.). — Soils of equatorial regions. Translated by R. L. *Rendleton. Ann. Arbor*, pp. 765, 1938, 1944.

MÜCKENHAUSEN (E.). — Uber gleyartige Böden im Rheinland. Z. Pflanzenernähr. Düng, *Bodenk*, **50**, (1951), 113-134, 1950.

MÜCKENHAUSEN (E.). — Der Wasserhaushalt der Pseudogleye und dessen Bedeutung für die Pflanzen, Congr. Internatl. Science du Sol, Hamburg, 24-31 août, 105-111, 1958.

MÜCKENHAUSEN (E.). — Die wichtigsten Böden der Bundesrepublik Deutschland. Verlag Kommentator G. m. b. H., Frankf. a. M., 1959.

PÉCROT (A.) et AVRIL (P.). — Les sols ardennais. II. Étude morphologique et génétique des sols hydromorphes associés aux sols bruns acides et aux sols podzoliques du Plateau de Saint-Hubert. *Bull. Instit. Agronom. et des Stat. de Recherch. de Gembloux*, **26**, 151-169, 1958.

PLAISANCE (G.). — La forêt de Chaux. *Revue du Bois*, avril et juillet 1949.

PLAISANCE (G.). — Observations sur les sous-sols marmoroïdes de certains sols de limon. *C. R. Acad. Sci.*, **236**, 2435-2437, 1953.

PLAISANCE.(G.). — Les couches aquifères perchées à éclipses. 6e Congr. Int. *Science du sol* Paris V, 553-558, 1956.

PLAISANCE (G.). — Les sols à simili-gley. *Bull. A. F. E. S.*, fév. nº 73, 392-416, 1956.

ROBERTS (J. C.). — Réduction of ferric hydroxide by strains of Bacillus polymyxa. *Soil Sci.* **63**, 135-140, 1942.

RICH (C. I.) et OBENSHAIN (S. S.). — Chemical and mineral properties of a Red-Yellow Podzolic soil derived from Sericite Schist. *Soil. Sei. Soc. Amer. Proc.*, **19**, (1955) ; 334-339, 1956.

SCHNEIDER (F.). — Ubergangsbildungen von mineralischen Grundwasserböden und gleyartigen Böden (Pseudogleyen) in Nord West-Deutschland. *Thesis Bonn et Zeitschr. f. Pfl.*, **65**, (110) nº 1-3, 1950. 1954.

SCHÖNHALS (E.). — Ergebnisse neuer Untersuchungen an Lössböden des Vogelsberges. *Notizbl. Hess. Landesamt. f. Bodenf. Wiesbaden*, **6**, p. 307-340, 1952.

SCHRŒDER (D.). — *Landw. Forsch.* 71, 1955.

SCHRŒDER (D.) et SCHWERTMANN (U.). — Zur Entstehung von Eisenkonkretionen in Böden. *Naturw.* **42**, 255-256, 1955.

SHAPIRO (R. E.). TAYLOR (G. S.) et WOLK (G. W.). — Soil oxygen contents and ion uptake by corn. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, **20** (1956), 193-197, 1957.

SLICHTER (C. S.). — Theorectical investigation of the notion of ground water. U. S. Geol. *Survey Ann. Rep.*, **19**, (2), 301-384, 1898.

SMITH. — Siltpan subsoils in W. Virginia — *Soil Sci.* **62**, 1946.

SUKATSCHEW (W. N.). — Die Untersuchung der Waldtypen des osteuropaïschen Flachlandes. In E. Abderhalden, Handb. Biol. *Arbeitsmethodik Abt. XI*, Teil 6, 191-250.

TAYLOR (S. A.). — Soil-air-plant relationships with emphasis on means characterizing soil aeration. Ph. D. Dissertation, Cornell University, 1949.

TJULIN(A. Th.). — Bodenk. und Pflanzenernähr. 21--22, 544, 1940.

TONNARD (V.). — La pédogenèse dans la forêt de Saint-Michel, *Bull. Inst. Agr. St. Rech. Gembloux* XXIII, 1, p. 66-89, 1955.

TSCHAPEK (M. W.). — Die Dichte des durch den Böden adsorbierten Wassers. *Zeitschrft. f. Pflanzenernähr. und Bodenk*, **34**, 265, 1943.

VAN DER MAREL (H. W.). — Tropical soils in relation to plant nutrition. *Soil Sci.* **64**, 445-451, 1947.

VOGEL VON FALKENSTEIN (K.). — Die Molkenböden der Bram-und Reinhardwälder im Buntsandsteingebiet der Overweser. *Internatl. Mitt. f. Bodenkunde*, **4**, 105-137, 1914-1915.

WILDE (S. A.). — Classification of gley soils for the purpose of forest management and reforestation. *Ecology*, **21**, 31-44, 1940.

WINTERS (E.). — Silica hardpan dévelopment in the red and yellow podzolic region. S. S. S. A. P. 7 (1942) 437-440, 1943.
WINTERS (E.) et SIMONSON (R. W.). — The subsoil. *Advances in Agronomy*, **3**, 2-92, 1951.
WYSSOTZKI (G. N.). — Gley, *Potschowowjedjenie*, **7**, 231-237, 1905.
ZAKOSEK (H.). — Uber die Deutung des Profilgepräges gleyartiger Böden. *Thèse Bonn.*, 1952.
ZAKOSEK (H.). — Uber die Pseudogleye in der Rheinpfalz, Notizbl. *Hess. L. Amt. Bodenforsh*, **82**, 258-268, 1945.
ZAKOSEK (H.). — Durchlässigkeitsuntersuchun5en an Böden unter besonderer Berücksichtigung der Pseudogleys. *Hess. Land. f. Bodenf*, 1960.

54

Le Directeur-Gérant : B. LACLAVIÈRE.

Imprimerie BUSSIÈRE à Saint-Amand (Cher), France. — 19-5-1961.
Dépôt légal : 2e trimestre 1961 N° d'impression : 600

631. 415. 1 : 631. 413. 2.

ACIDITÉ D'ÉCHANGE ET ALUMINIUM LIBRE OU ÉCHANGEABLE DES SOLS

PAR

R. BLANCHET, S. PERIGAUD, C. CHAUMONT et J. C. NADEAU
Station agronomique, Châteauroux

S.

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

Techniques expérimentales.

Sols étudiés.
Techniques d'extraction de l'aluminium et des ions H^+.
Capacités d'échange et degrés de saturation en cations usuels.
Concentration en Al des solutions du sol et des eaux de drainage.
Courbes de désorption ou de dissolution de l'aluminium.
Dosage de l'aluminium.

Résultats.

Les composantes de l'acidité d'échange : aluminium et ions H^+.
Etude de quelques profils de sols lessivés ou podzoliques.
Apparition d'aluminium « libre » au cours de l'acidification d'un sol.
Examen de quelques sols à évolution latéritique.
États de cet aluminium dans le sol.
Courbes de désorption ou de dissolution de l'aluminium.
Bilans de cations échangeables.
Complexes colloïdaux de l'aluminium.
Conséquences de la présence d'aluminium.
Neutralisation du sol et besoin en chaux.
Dynamique du phosphore.
Toxicité à l'égard des plantes.

Conclusions.

INTRODUCTION

L'acidité du sol peut être examinée à l'aide de diverses méthodes et exprimée par différents critères : pH mesuré dans l'eau ou dans une solution saline, acidité d'échange, degré de saturation en bases :

$$\frac{(Ca^{++} + Mg^{++} + K^{+} + Na^{+})}{T}.$$

L'accord entre les résultats fournis par ces techniques variées n'est souvent pas très bon ; ainsi la relation entre le pH et le degré de saturation est parfois très lâche.

L'acidité du sol est en effet une donnée complexe. Le pH donne une indication de l'activité des ions H^+ dans un système sol-eau ou sol-solution saline, compte tenu de toutes les réserves que peut comporter cette détermination d'activité tant sur le plan théorique que sur le plan technique (agitation, chocs de particules contre les électrodes). Dans la mesure de l'acidité d'échange, le dosage indique en principe la quantité d'ions H^+ libérés par le sol. Cependant, plusieurs auteurs ont remarqué depuis longtemps que l'extrait renferme souvent de l'aluminium qui précipite sous forme d'hydroxyde au moment de la titration (KAPPEN, GUEDROITZ, 1). L'acidité dosée est alors la somme des ions H^+ libérés par le sol et des ions H^+ libérés par la précipitation d'hydroxyde d'aluminium (GILLY, 1). Cet aluminium, déplacé du sol par une solution saline neutre non tamponnée, est considéré par certains auteurs comme échangeable ; dans cette hypothèse, la teneur du sol en ions H^+ n'est pas la différence T — S, où $S = Ca^{++} + Mg^{++} + K^+ + Na^+$, puisque Al^{+++} n'est pas compris dans le terme S.

De même, dans la méthode BRAY et WILLHITE (2), où le dosage des bases échangeables est affectué globalement par acidimétrie après élimination des ions NH_4^+, on ne tient pas compte de l'aluminium qui, comme nous le verrons plus loin, n'est pas extrait dans ces conditions. Le dosage précis des ions H^+ s'avère donc difficile.

Des travaux récents ont montré que les argiles-H sont susceptibles de s'aluminiser spontanément : des ions H^+ pénètrent à l'intérieur du réseau, et sont remplacés par des ions Al^{+++} (TCHERNOV, GASTUCHE, LAUDELOUT et EECKMANN, 3, 4, 5). Ces ions Al^{+++} paraissent bien échangeables, au même titre que les cations habituels. ALECHINE fait toutefois remarquer que l'hydroxyde d'aluminium est insoluble en milieu neutre, et qu'en conséquence il ne peut s'agir d'ions échangeables (6) ; en ajoutant de l'aluminium à une argile, le même auteur a d'ailleurs observé des précipitations de gibbsite.

On doit noter cependant que l'aluminium extractible par les sels neutres n'a guère été rencontré en quantités importantes que dans des sols nettement acides, de pH 4 à 5 (7, 8, 9, 10, 11, 12, 13) ; la solubilité de l'aluminium est alors appréciable (14), et des ions Al^{+++} sont susceptibles de se trouver à l'état échangeable, de même que les cations métalliques habituels et les ions H^+.

A un pH de l'ordre de 5, de nombreuses formes d'aluminium peuvent coexister. Ce pH correspond en effet à la précipitation à peu près totale, en solutions diluées, de l'hydroxyde d'aluminium (14). Entre les états Al^{+++} et $Al(OH)_3$, cette précipitation s'effectue par une série d'intermé-

diaires tels que $AlOH^{++}$, $Al(OH)_2^+$..., de compositions complexes. D'autre part, la présence dans le sol d'ions PO_4 et de silice colloïdale peut conduire à la formation de phosphates d'aluminium peu solubles, du type variscite (15, 16), et de complexes alumino-siliciques (17). C'est donc toute une série de composés aluminiques que l'on doit s'attendre à rencontrer dans le sol sous une forme assez facilement extractible. Selon le pH du milieu, la forme échangeable Al^{+++} ou les formes précipitées peuvent prédominer. Enfin, l'aluminium extrait pourrait parfois provenir de l'attaque du réseau cristallin des argiles par le réactif d'extraction.

Sans prétendre à identifier de façon précise ces diverses formes d'aluminium, nous rapportons ici les résultats obtenus dans l'examen de divers sols acides plus ou moins pauvres en bases. Nous nous attacherons surtout à montrer l'existence de quantités relativement bien définies d'aluminium labile, en précisant les conditions de leur apparition, et en dégageant les conséquences relatives au dosage des ions H^+. Nous donnerons enfin quelques indications sur les conséquences que peut entraîner cette présence d'aluminium.

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

1° Sols étudiés.

a) *Sols de Brenne.* — Une large part des études a porté sur les sols et sous-sols d'une région naturelle, la Brenne. Ces sols appartiennent à des types assez divers, allant des sols bruns plus ou moins fortement lessivés jusqu'aux podzols à couche d'alios ; ils ont été décrits par ailleurs (20). Rappelons seulement quelques-uns de leurs caractères essentiels :

— horizons superficiels sablo-limoneux, renfermant en moyenne 5 à 10 p. 100 d'argile et 2 à 3 p. 100 de matière organique, faiblement acides (pH de l'ordre de 6) ; ils ont souvent été chaulés.

— forte accumulation argileuse en profondeur, vers — 50 cm, où la teneur en argile atteint parfois 50 p. 100 ; ces horizons sont nettement acides (pH 4 à 5,5), marmorisés, et contiennent souvent des concrétions ferrugineuses. Le degré de saturation en bases est faible (50 à 80 p. 100),

— les caractéristiques du profil, jointes à la faible pente du terrain, entrainent une hydromorphie générale : les sols sont ennoyés pendant tout l'hiver et le début du printemps.

Les profils examinés appartiennent presque tous à des terres cultivées (polyculture ou prairies), fournissant de faibles rendements. Les caractéristiques exactes des divers prélèvements seront indiquées ci-dessous, en les comparant à leurs teneurs en ions H^+ et en aluminium « libre ».

b) *Sol de limon acidifié par des apports répétés d'engrais ammoniacaux.* — Ce sol appartient à l'expérience dite des 42 parcelles du Centre National de Recherches Agronomiques de Versailles. Sa composition était la suivante, au début de l'expérience :

Argile (type illitique) .	15,3 %	Ca échangeable	2,7 ‰
Limon	15,2 %	K échangeable	0,06 ‰
Sable fin	61 %	Mg échangeable	0,18 ‰
Sable grossier	2,6 %	pH	6,2
Matière organique	3,9 %		

Les différentes parcelles constituant cette expérience ont été soumises depuis 1929 à des traitements divers : apports annuels d'engrais variés, de matière organique, chaulage... Elles sont laissées sans culture. Des prélèvements d'échantillons de terre sont effectués chaque année, avant les apports d'engrais ou d'amendements. Nous avons examiné ici les prélèvements des années 1929, 1933, 1938, 1945 et 1955, se rapportant aux traitements suivants :

— parcelles témoins, ne recevant ni engrais ni amendements ;

— parcelles chaulées, à raison de 1 500 kg de CaO par hectare et par an ;

— parcelles recevant chaque année 150 kg N par hectare, sous forme de chlorure d'ammonium.

Ces dernières parcelles se sont fortement acidifiées sous l'effet des engrais ammoniacaux. Nous avons suivi, en fonction du temps, l'évolution de l'acidité d'échange et l'apparition d'aluminium libre.

c) *Sols à évolution latéritique.* — Nous avons enfin examiné quelques sols et sous-sols ferrugineux tropicaux ou latéritiques des Antilles Françaises. Dans quelques-uns d'entre eux, la gibbsite avait pu être caractérisée au moyen des diagrammes de rayons X.

2° **Techniques d'extraction de l'aluminium et des ions H^+.**

Trois sortes de solutions extractives ont été utilisées, au cours de percolations :

a) *Solutions de sels neutres, non tamponnées* : au contact d'un sol acide, ces solutions non tamponnées acidifient le milieu grâce à l'échange entre les cations de la solution et les ions H^+ retenus par la terre (réaction utilisée dans la mesure du pH-KCl). Les ions H^+ sont ainsi libérés, et extraits par la percolation. Le pH initial de l'ordre de 4 permet également le passage en solution de l'aluminium libre, que l'on recueille dans le filtrat. L'acidité de celui-ci diminue au fur et à mesure que l'épuisement se poursuit.

Nous avons utilisé les sels neutres suivants : KCl N (techniques de GILLY, 1, et de YUAN, 7) ; $BaCl_2$ N (technique de LAUDELOUT, 5) NH_4Cl N.

Les résultats obtenus au moyen de ces différents chlorures sont du même ordre de grandeur ; ils seront détaillés ci-dessous.

b) *Solutions tamponnées d'un sel neutre* (méthode PARKER, 21). Cette technique, qui consiste à percoler le sol par une solution normale et neutre d'acétate de baryum, permet l'extraction complète des ions H^+ ; ceux-ci sont dosés dans le filtrat par titrage potentiométrique.

La méthode est critiquable dans le cas des sols acides pouvant renfermer de l'aluminium échangeable : le réactif, fortement tamponné, amène le sol à pH 7, et les ions Al^{+++} fixés précipitent à l'état d'hydroxyde d'aluminium en libérant des ions H^+ qui sont entrainés dans le filtrat :

$$Al^{+++} + 3H_2O \overset{pH7}{\rightleftarrows} Al(OH)_3 + 3H^+.$$

L'acidité obtenue ainsi peut donc être la somme des ions H^+ préexistant dans le sol et des ions H^+ libérés par la précipitation de l'alumine. L'extraction d'aluminium est toujours nulle ou très faible, en raison de l'insolubilité de l'hydroxyde dans ces conditions. Il en est de même si l'on utilise la solution normale et neutre d'acétate d'ammonium.

c) *Solution acétique tamponnée à pH* 4. — Afin de permettre précisément le maintien à l'état soluble et l'extraction d'ions Al^{+++} échangeables, des percolations ont été effectuées par une solution sensiblement normale d'acide acétique et d'acétate de baryum, tamponnée à pH 4. Le sol est ainsi maintenu acide pendant toute la durée de l'extraction, et la solubilité de l'aluminium « libre » est assurée.

On peut craindre que ces conditions entrainent une attaque du réseau cristallin des argiles ; d'après les résultats obtenus sur divers sols, cette attaque, si elle existe, reste faible.

Pour l'ensemble de ces épuisements, la percolation a été effectuée sur 5 g de terre, et conduite lentement par fractions de 20 ml. Le volume total de liquide percolé a varié de 120 à 150 ml. L'allure de ces divers épuisements est indiquée par les courbes des graphiques 2, 3, 4.

3° **Capacités d'échange et degrés de saturation en cations usuels.**

Les cations échangeables Ca^{++}, Mg^{++}, K^+, Na^+ et leur somme S ont été déterminés par percolation du sol avec une solution normale et neutre d'acétate d'ammonium. La capacité d'échange T a été mesurée ensuite en éliminant l'excès d'ammonium par lavage avec l'alcool éthylique, puis déplacement des ions NH_4^+ adsorbés par une solution à 10 p. 100 de ClNa, N/20 en ClH. Le rapport $S/T \times 100$ est le degré de saturation du sol en cations échangeables « usuels », l'aluminium étant éventuellement considéré isolément.

Le traitement des sols acides par l'acétate d'ammonium neutre pourrait entrainer la précipitation d'hydroxyde d'aluminium au contact des

particules d'argile, et altérer ainsi leur capacité d'échange. Nous avons contrôlé que cet effet est négligeable en dosant les cations échangeables et T après le traitement à la solution de chlorure d'ammonium, qui élimine l'aluminium « libre » (paragraphe 2 a ci-dessus). Dans ce cas l'analyse est conduite ainsi :

— traitement par $ClNH_4$, dosage des cations échangeables, de Al et de H^+ sur le filtrat.

— traitement par CH_3COO NH_4 neutre, pour amener le sol à pH 7.

— lavage à l'alcool et épuisement par le mélange ClNa-ClH pour déterminer T.

Le prétraitement par le chlorure d'ammonium ne modifie sensiblement ni S, ni T.

Nous avons enfin vérifié que les sols des parcelles d'expérience recevant des engrais ammoniacaux ne renfermaient pas des quantités appréciables d'ions NH_4^+ échangeables.

4° Concentration en Al des solutions du sol et des eaux de drainage.

Nous avons examiné les concentrations en Al des solutions de sols renfermant des quantités importantes d'aluminium extractible par les réactifs indiqués ci-dessus. A cet effet, la terre était mise en suspension au rapport terre/eau = 1/4 dans une solution de chlorure de calcium 0,002 N (force ionique comparable à celle des eaux de drainage de ces sols), et agitée pendant deux heures. La concentration en Al des solutions n'augmente plus au bout d'une heure d'agitation, et reste toujours faible.

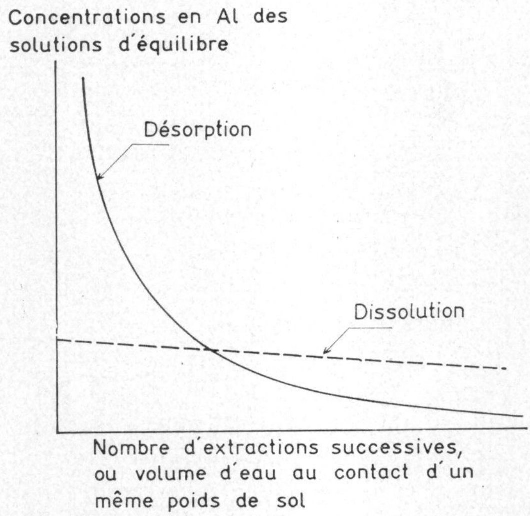
Des réseaux de drainage en poterie étant installés dans certains sols étudiés, le dosage de l'aluminium a également été effectué dans les eaux de drainage, avant ou après minéralisation de la matière organique et insolubilisation de la silice de ces eaux (attaque par l'eau régale, dessiccation, et reprise par l'acide chlorhydrique).

5° Courbes de désorption ou de dissolution de l'aluminium.

La distinction entre les formes adsorbées et les formes précipitées d'un élément dans le sol peut être faite en soumettant celui-ci à des extractions successives par de l'eau ou des solutions salines diluées. Si l'élément est précipité, sa concentration dans les solutions, à l'équilibre, reste à peu près constante — ou diminue faiblement ; on obtient sensiblement une droite en portant les concentrations en fonction du nombre d'extractions (22, graphique 1). Au contraire, si l'élément est adsorbé, sa concentration dans les solutions diminue d'abord rapidement, puis plus progressivement au fur et à mesure des extractions ; la représenta-

tion graphique fait apparaître la forme d'une courbe de désorption (23). L'application de cette technique a permis à FRIED et SHAPIRO de distinguer des formes adsorbées et des formes précipitées de phosphates du sol (22). Rappelons que la courbe de désorption des éléments échangeables retenus par le sol n'obéit souvent pas exactement aux lois théoriques de l'adsorption, mais s'en rapproche nettement (23, 31).

Nous avons appliqué cette technique à divers sols libérant des quantités importantes d'aluminium au cours des traitements par des solutions salines neutres non tamponnées. A cet effet, des quantités constantes de terre sont mises au contact de volumes croissants d'une solution d'acétate



GRAPHIQUE 1. — Schéma de la forme des courbes de désorption et de dissolution.

de calcium 0,01 N, amenée préalablement au pH du sol, dans des rapports sol/solution variant de 2/3 à 1/1 000. Les suspensions sont agitées jusqu'à l'obtention de l'équilibre, en contrôlant qu'il ne se produit pas de modifications de pH, puis l'aluminium est dosé dans la phase solution.

Afin d'examiner la libération de l'aluminium par un matériau homogène et pur, cette technique a été également appliquée à une suspension de montmorillonite-H provenant du gisement de Camp-Bertaux (Maroc), qui s'était aluminisée au cours de sa conservation (5). Cette argile avait été lavée par HCl 0,2 N, dispersée à pH 9 par NaOH, floculée par HCl dilué et lavée à l'eau jusqu'à élimination du chlore. Le PH de cette suspension était de 3,6.

6° Dosage de l'aluminium.

Selon les réactifs d'extraction utilisés, deux procédés de dosage ont été adoptés :

— l'acidimétrie pour les extractions par les solutions de KCl ou $BaCl_2$;

— la colorimétrie pour les extractions par les solutions tamponnées, les solutions du sol, les courbes de dissolution ou désorption, et les eaux de drainage.

a) *Acidimétrie.* — Nous avons utilisé la méthode de YUAN (7), qui consiste à neutraliser en présence de phénolphtaléine le filtrat par NaOH O,1 N, ce qui entraine la précipitation de Al en Al $(OH)_3$, puis à ajouter du fluorure de sodium qui complexe Al, et à titrer par HCl O,1N les ions OH^- libérés par le passage de Al de la forme Al $(OH)_3$ à la forme fluoaluminate de sodium Al F_6Na_3 :

$$Al(OH)_3 + 6NaF \rightarrow AlF_6Na_3 + 3Na^+ + 3OH^-.$$

Le premier tritrage par NaOH indique la somme (H^+ + Al). c'est-à-dire « l'acidité d'échange », et le second titrage par HCl permet de doser Al seul. Les ions H^+ représentent la différence entre le premier et le second titrage.

Dans le cas de l'extraction par Cl_2Ba, il est nécessaire d'éliminer les ions Ba^{++} avant l'adjonction de NaF, car il se produirait une précipitation de BaF_2 empêchant la formation du complexe fluoaluminique. Nous avons tourné cette difficulté en insolubilisant Ba sous forme SO_4Ba entre les deux titrations. La suite des opérations est alors la suivante :

— titration par NaOH en présence de phénolphtaléine ;

— introduction d'une quantité d'acide sulfurique correspondant sensiblement à la quantité de baryum présente ;

— retour à une très faible coloration rose de la phénolphtaléine ;

— adjonction de NaF ;

— titration par HCl ;

Le précipité de sulfate de baryum masquant un peu le virage de l'indicateur, il est bon d'opérer en présence d'un témoin.

b) *Colorimétrie.* — Le dosage colorimétrique de l'aluminium a été effectué par l'aluminon (acide aurine tricarboxylique), selon la technique indiquée par CHARLOT et BEZIER (24, 25). La méthode donne satisfaction à la condition de ne guère dépasser 1 μ g Al par ml de solution finale, et d'introduire dans chaque série de dosages une gamme-étalon. Nous avons modifié légèrement la préparation du réactif contenant à la fois l'aluminon et le mélange-tampon ; la technique adoptée est la suivante :

— dissoudre 1,8 g de chlorure d'ammonium dans 100 ml d'eau, ajouter 25 ml d'acide acétique cristallisable, et une quantité suffisante d'ammoniaque pour amener le pH à 4,8.

— dissoudre dans ce mélange 0,1 g d'aluminon, en broyant au mortier et en effectuant des décantations successives ;

— compléter à 200 ml.

Nous n'avons pas ajouté de corps stabilisant les suspensions (gélatine, gomme arabique, amidon...), qui introduisent souvent des impuretés.

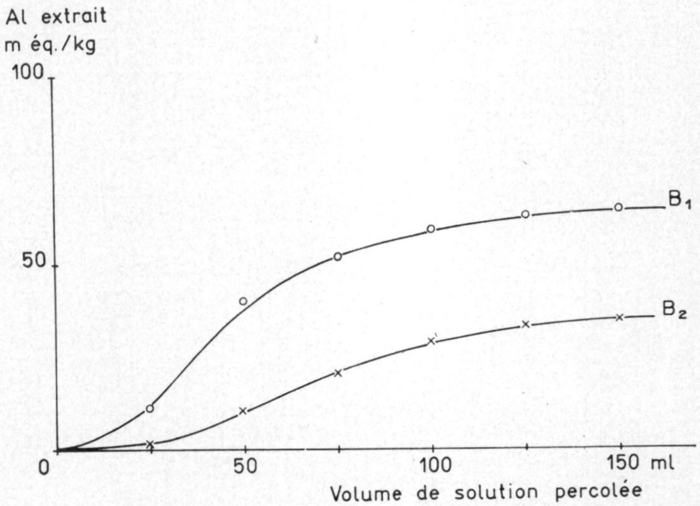
Pour le dosage, on ajoute 1 ml de ce réactif à un volume convenable de solution à doser diluée à 5 ml, on porte 4 minutes au bain-marie bouillant, on refroidit aussitôt, et la colorimétrie est faite à 530 mμ au bout de 15 minutes. Dans le cas d'extraits acétiques de sols, il est nécessaire d'introduire la quantité d'acide ou de base nécessaire pour amener le pH de cet extrait à 4,8, cette valeur étant optimum pour le développement de la coloration.

RÉSULTATS

A. — Les composantes de l'acidité d'échange : aluminium et ions H^+.

1° Étude de quelques profils de sols lessivés ou podzoliques.

Le tableau I indique quelques exemples des résultats obtenus par divers réactifs d'extraction appliqués à différents sols et sous-sols de Brenne. Il s'agit d'abord de cinq profils de sols à évolution podzolique,



GRAPHIQUE 2. — Al extrait en fonction du volume de solution de chlorure de baryum percolée, dans deux horizons d'un sol podzolisé.

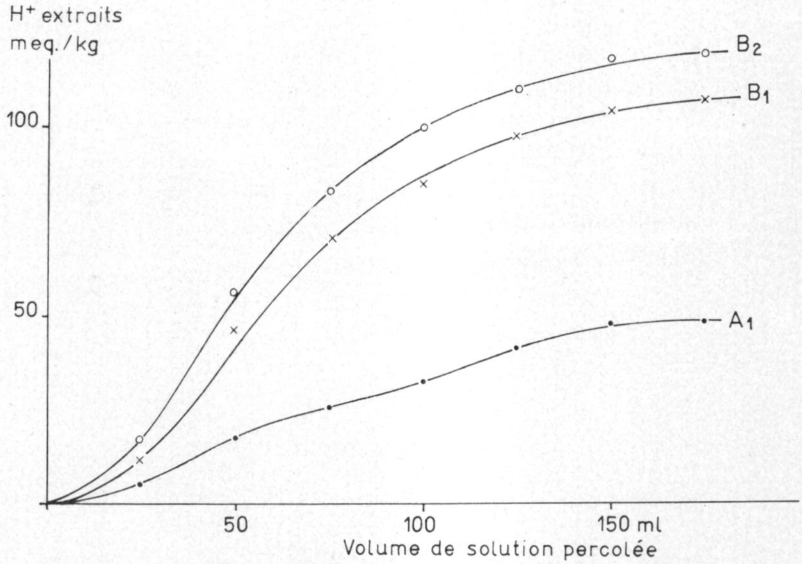
dont les horizons profonds sont acides et présentent un faible rapport S/T, puis de deux profils de sols fortement lessivés mais peu désaturés quoique parfois acides, et enfin d'horizons argileux non acides et bien saturés provenant de quelques sous-sols. Tous ces sols ont un très mau-

Tableau I

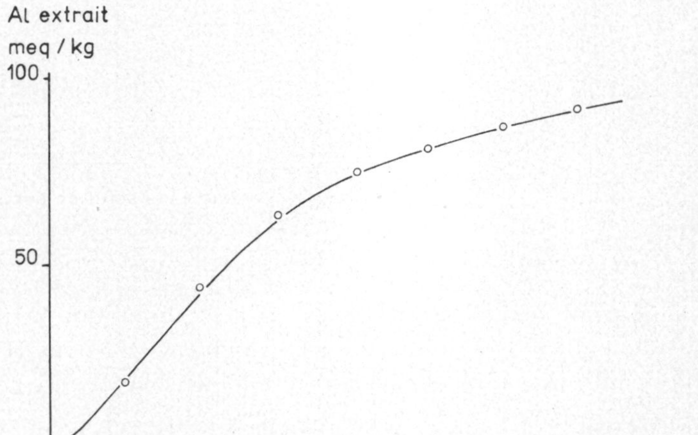
Profil nº	Type de sol	Horizon	Argile %	pH	S/T × 100	Al extrait, méq. par Kg de sol				H+ extrait, méq. par Kg de sol		
						KCL	$BaCl_2$	Acétate Ba-acide acétique pH 4	Acétate Ba pH 7	KCL (a)	$BaCl_2$ (a)	Acétate Ba pH 7
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
850 1	podzolisé	A_1	14,6	6,1	79	0	0	29,4	0	2,5	0	21,4
2		B_1 g	42,8	4,8	44	43	48,5	74,5	2,8	7,8	1,8	70
3		B_2 g	55,5	4,5	51	82,5	69,5	90,5	3,6	11	2,8	90,4
450 1	podzolique	A_1	10,1	5,9	50	0	0	6,7	0	2	0	20
2		B_2	20,8	5,6	50		47,6	27,1	0	4	0,6	62
3		Bg	60,3	4,7	58	79,5	65	92,5	2,8	7	0	92
482 1	lessivé,	A_1	11,6	6,4	92	0	0	8	0	1,9	0	14
2	sur dépôt	B_1 g	23,6	4,8	54	54,5	45,5	69	0,3	6,3	0	60
3	argileux	dépôt arg.	27	4,8	56	57	44,2	66	0	0	0	40
476 1	podzolisé	A_1	9,3	5,5	46	2,6	0	23,4	0	3,3	5,8	30
2		B g	42,1	4,9	24	27,7	27	47	0,3	5	0	34
3		dépôt géol.	17,7	4,9	36	13	13	21,3	0	4	0,4	14
614 1	podzolique	A_1	13,4	6,3	85	0	0	4,7	0	2	0	3
2		A_2	16,2	5,5	68	2,6	0	7 4	0	3	0	3
3		B_1 g	38,5	4,9	32	65,5	63,3	76,4	4,5	8,5	0	44
106 1	podzolique	A_1	6,2	7,3	100		0	1,1	0		0	
2		A_2	4,1	7,5	100		0	1,1	0		0	
3		B g	41,7	4,9	87		0	1,7	0		2,2	
350 1	lessivé	A_1	3,3	6,3	100		0	2,2	0		0	0
2		A_2	0,2	6,6	100		0	1,8	0		0	0
3		B	65	6,5	95		0	15,2	0		0	8
422 2	lessivé	B	16,8	6,7	93		0	9,4	0		0	10
165 3	dépôts argileux de		35	7,5	100		0	6,6	0		0	0
150 2	faible profondeur		53,6	7,5	100		0	6,4	0		0	0
417 2	(— 50 cm) d'origine		62	6,9	100		0	10,6	0		0	
227 2	géologique		75	8,1	100		0	9	0		0	

(a) Il s'agit d'ions H^+ réellement présents dans le filtrat ; les ions H^+ libérés en cours de titration par la précipitation de Al^{+++} ont été déduits.

vais drainage naturel, en raison à la fois de l'accumulation d'argile en profondeur et de la roche-mère imperméable (20).



GRAPHIQUE 3. — Ions H^+ extraits en fonction du volume de solution d'acétate de baryum neutre percolés, dans différents horizons d'un sol podzolisé.

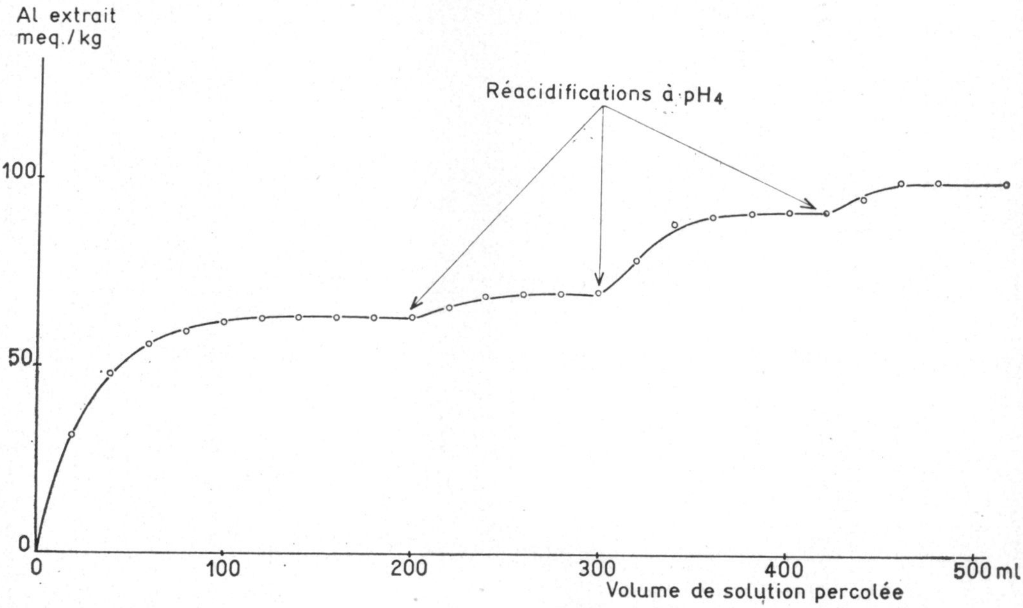


GRAPHIQUE 4. — Al extrait en fonction du volume de solution acide-acétique-acétate de baryum percolée.

Les indications suivantes se dégagent de ces résultats :

a) L'aluminium extractible par les solutions de chlorures de potassium ou de baryum apparaît lorsque les sols sont acides (pH égal ou infé-

rieur à environ 5,5) et désaturés (S/T ⩽ 60). Les horizons superficiels moins acides et moins désaturés (ils ont parfois été chaulés) ne libèrent pas de quantités notables d'aluminium dans ces conditions ; il en est de même des horizons profonds parfois acides mais non désaturés portés sur la deuxième partie du tableau. Les quantités d'aluminium libérées sont élevées, elles atteignent quelquefois la moitié de la valeur de T. Les résultats obtenus avec KCl et $BaCl_2$ sont comparables (NH_4Cl, utilisé sur quelques échantillons, fournit également des valeurs du même ordre de grandeur). Enfin, les quantités d'aluminium libérées ne dépendent pas étroitement de la teneur du sol en argile.



GRAPHIQUE 5. — Influence de réacidifications successives sur l'extraction d'aluminium par la solution neutre de chlorure de baryum.

b) On pourrait néanmoins se demander si cet aluminium ne provient pas de l'attaque du réseau des argiles sous l'influence des ions H^+ libérés par échange contre K^+ ou Ba^{++} selon la réaction bien connue :

$$\text{Argile} - H + K^+ + Cl^- \rightarrow \text{Argile } K + H^+ + Cl^-.$$

Pour contrôler cette hypothèse, nous avons effectué les essais suivants :

α) 10 g de terre libérant des quantités importantes d'aluminium (nº 850-3) ont été additionnés de 25 ml de solution de $BaCl_2$ neutre. Au bout de quinze minutes de contact, le pH de la suspension était de 4. Cette suspension a été versée sur filtre et percolée avec des fractions successives de Cl_2Ba jusqu'à ce qu'elle ne cède plus d'Al (graphique 5). Le pH était alors de 4,9.

La terre a ensuite été ramenée à pH 4 avec HCl 0,1 N, et. après quinze minutes de contact, percolée de nouveau par $BaCl_2$ N jusqu'à épuisement de la petite quantité d'aluminium réapparue. Deux autres réacidifications successives à pH 4 suivies de percolations par $BaCl_2$ N ont été réalisées de la même façon ; les résultats sont représentés sur le graphique 5. Chaque acidification est accompagnée de la libération d'une quantité d'aluminium beaucoup plus faible que celle qui est apparue au cours de la première percolation, bien que le traitement acide soit assez énergique.

L'essentiel de l'aluminium libéré au cours de la percolation initiale préexistait donc bien dans le sol sous une forme particulièrement labile, une faible part seulement pouvant provenir de l'attaque de l'argile. Inversement, le ralentissement de l'extraction d'Al au fur et à mesure de la percolation n'est pas dû à l'acidité insuffisante du milieu, mais à l'épuisement de la forme d'Al considérée.

b) Nous avons effectué un second essai représentant l'inverse du précédent : plusieurs terres argileuses ne libérant pas d'Al sous l'effet de KCl ou $BaCl_2$ ont été additionnées de solution de chlorure de baryum et acidifiées jusqu'à pH 4. Après quinze minutes de contact, elles ont été versées sur filtre et percolées par la même solution. La libération d'Al a été nulle ou extrêmement faible, inférieure à 0,5 méq. par kg de terre.

On peut donc dire que, si une légère attaque de l'argile n'est pas impossible, l'essentiel de l'aluminium extrait par les solutions de chlorures se trouve dans le sol sous une forme très labile, qui n'existe pas dans les terres neutres ou suffisamment saturées en cations métalliques habituels.

c) Cette conclusion apparaît également lorsque l'on considère l'aluminium déplacé par la solution acide acétique-acétate de baryum tamponnée à pH 4 (tableau I) :

— les quantités d'Al libérées sont faibles dans les sols où les chlorures sont sans action ;

— dans les autres sols, elles sont régulièrement un peu plus fortes que les extractions par les solutions de chlorures, mais elles restent du même ordre de grandeur ;

d) Si l'on considère maintenant la colonne 10 du tableau I, on constate que la solution neutre d'acétate de baryum ne déplace que des quantités insignifiantes d'aluminium. Il en est d'ailleurs de même des solutions neutres d'acétate d'ammonium. Ce résultat n'est pas surprenant, Al étant à pH 7 précipité sous forme d'hydroxyde. Même si des ions Al^{+++} sont réellement échangeables, ils ne peuvent être extraits par ces réactifs, car ils se trouvent immédiatement précipités au contact du sol, selon la réaction rappelée ci-dessus. D'autre part, les ions H^+ que l'on trouve dans

le filtrat ne préexistaient pas nécessairement dans le sol, ils peuvent provenir de la précipitation de l'aluminium.

e) Comparons précisément les trois dernières colonnes du tableau I (colonnes 11, 12, 13), qui indiquent les quantités d'ions H^+ trouvées dans les filtrats correspondant aux percolations par KCl, $BaCl_2$ et $Ba(CH_3COO)_2$ neutres. On constate immédiatement que les solutions de chlorures ne font apparaître dans le filtrat que très peu d'ions H^+, et par contre beaucoup d'aluminium, alors que la solution neutre d'acétate de baryum libère une grande quantité d'ions H^+, et très peu ou pas du tout d'aluminium (colonnes 6,7 et 11, 12 d'une part, 9 et 13 d'autre part).

L'acidité d'échange libérée par les solutions neutres non tamponnées est donc essentiellement de l'aluminium, fait qu'a observé également GILLY (1). Les ions H^+ mis en évidence par la solution d'acétate de baryum ne préexistaient vraisemblablement pas tous dans le sol, et, connaissant la réaction qui conduit à leur apparition au moment de la précipitation de Al $(OH)_3$, on peut raisonnablement penser que les extraits KCl et $BaCl_2$ donnent une image plus fidèle de la réalité.

Remarquons d'ailleurs que, en première approximation, la somme $(Al^{+++} + H^+)$ trouvée dans ces extraits est du même ordre de grandeur que la quantité d'ions H^+ contenue dans le filtrat acétique, ce qui est logique :

$$(Al^{+++} + H^+)ClK \neq H^+ \text{ acétate Ba.}$$

On ne peut cependant déduire de ces seuls faits que, dans les sols étudiés, l'acidité d'échange est presque uniquement due à des ions Al^{+++} échangeables. D'autres réactions secondaires sont en effet susceptibles d'intervenir avec l'aluminium, et peuvent faire disparaître des ions H^+. Par exemple, si Al se trouvait sous la forme Al $(OH)_2{}^+$, la réaction suivante se produirait au contact des ions H^+ libérés par échange contre des ions K^+ ou Ba^{++} :

$$Al(OH)_2^+ + 2H^+ \rightarrow Al^{+++} + 2H_2O.$$

et il n'apparaît dans le filtrat que Al^{+++}, bien que le sol renferme également des H^+. Le concours d'autres techniques est donc nécessaire pour mieux se rendre compte des phénomènes réels.

En résumé, l'examen de ces quelques sols choisis à titre d'exemples nous montre qu'il apparaît dans les terres acides désaturées des quantités importantes d'aluminium se trouvant sous des formes particulièrement labiles, distinctes de l'Al du réseau cristallin des argiles. Cet aluminium, qui représente certainement une part importante de l'acidité d'échange, est mis en évidence par le traitement des sols avec des solutions neutres non tamponnées. Les réactions secondaires qui sont susceptibles d'intervenir au cours de ce traitement ne permettent pas de faire la part exacte entre les ions Al^{+++} et les ions H^+ dont la somme représente l'acidité d'échange.

2° Apparition d'aluminium « libre » au cours de l'acidification du sol de limon de Versailles.

Le tableau II indique les pH, degrés de saturation et composantes de l'acidité d'échange mesurés sur les sols des parcelles « témoin » et « chlorure d'ammonium » à divers stades de l'acidification de celles-ci. Une baisse notable du pH des parcelles témoin est intervenue au cours des 25 années considérées ; il apparaît quelques traces d'Al déplaçables par $BaCl_2$. Mais l'acidification et la baisse du taux de saturation sont considérablement plus marquées dans la parcelle à chlorure d'ammonium, où l'on observe l'apparition de quantités importantes d'aluminium labile. En raison de la très forte acidité du sol de 1955, une légère extraction d'Al se produit même avec la solution neutre, d'acétate de baryum.

TABLEAU II

Année du prélèvement	pH	S/T × 100	Al extrait, méq. par kg de sol			H+ extrait, méq. par kg de so		
			$BaCl_2$	NH_4Cl	Acétate Ba	$BaCl_2$ (1)	NH_4Cl (1)	Acétate Ba (1)
Parcelle témoin								
1929	6,1	100	0	0	0	0	27	0
1933	6,4	100	0	0	0	0	29	0
1938	6	96	0	0	0	0	31	0
1945	5,6	88	3	0	0	1	54	0
1955	5,5	85	4	0	0	0	34	0
Parcelle à chlorure d'ammonium								
1929	6,3	97	0	0	0	0	32	0
1933	5,05	73	10	0	0	1	40	8
1938	4,3	63	21	14	0	7	42	40
1945	4,2	49,5	29	29	0	10	40	47
1955	3,7	27,5	64	60	16,6	5	38	45,5

(1) Ions H^+ réellement présents dans le filtrat ; la déduction des H^+ libérés au cours de la neutralisation de ce filtrat par la précipitation de Al^{+++} a été faite.

En ce qui concerne les ions H^+, une grande discordance se manifeste selon le réactif d'extraction : ils apparaissent peu nombreux avec $BaCl_2$, plus abondants et en quantité relativement constante avec NH_4Cl, très abondants avec l'acétate de baryum dans les sols fortement acidifiés.

Malgré ces discordances difficiles à expliquer, il ressort nettement de ces essais que l'acidification du sol a fait apparaître de fortes teneurs en Al « libre », dans des conditions comparables à celles qui ont été observées dans les profils décrits ci-dessus : pH de l'ordre de 5, S/T voisin de 60.

3° Examen de quelques sols à évolution latéritique.

Un groupe de sols ferrugineux tropicaux et latéritiques a été soumis à la percolation par les solutions de $BaCl_2$ N. Les quantités d'aluminium trouvées ont été faibles, bien que ces sols renferment souvent de la gibbsite. A titre d'exemple, voici les résultats obtenus sur un sol latéritique, dans lequel la gibbsite avait été mise en évidence :

	pH	S	T	S/T × 100	Al, méq./K
Sol	5	30	180	17	4,5
Sous-sol	5,7	30	98	32	3,3

Ce réactif n'attaque donc pas notablement l'hydroxyde d'aluminium cristallisé, mais surtout des formes d'Al moins résistantes : Al^{+++} échangeables, précipités gélatineux..., qui se trouvent plutôt dans les sols du groupe podzolique.

B. — État de cet aluminium dans le sol

Dans l'étude de ce problème, nous considérerons surtout les indications données par les courbes de désorption ou de dissolution, les bilans de cations échangeables concourant à la capacité d'échange T, et la destruction des complexes éventuels de l'aluminium avec la silice et la matière organique.

1° Courbes de désorption ou de dissolution de l'aluminium.

Nous examinerons d'abord les résultats obtenus sur la montmorillonite pure, où l'aluminium remplace, à l'état échangeable, des ions H^+ (5), puis nous comparerons à cette argile servant en quelque sorte d'étalon quelques terres de Versailles et de Brenne.

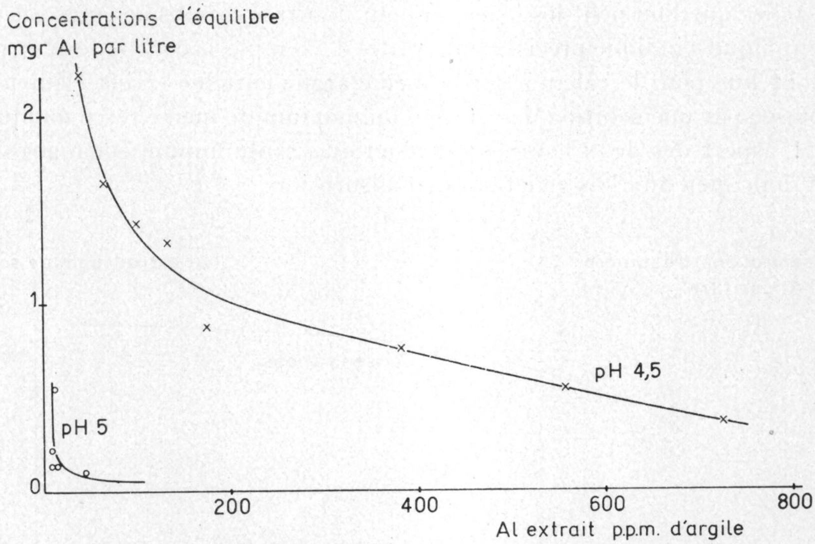
a) *Montmorillonite pure.* Deux suspensions de montmorillonite ont été amenées par l'eau de chaux respectivement à pH 4,5 et 5, et abandonnées ainsi pendant deux jours. Elles renfermaient alors :

— à pH 4,5 : 64 méq./kg d'Al^{+++} extractible par Cl_2Ba N

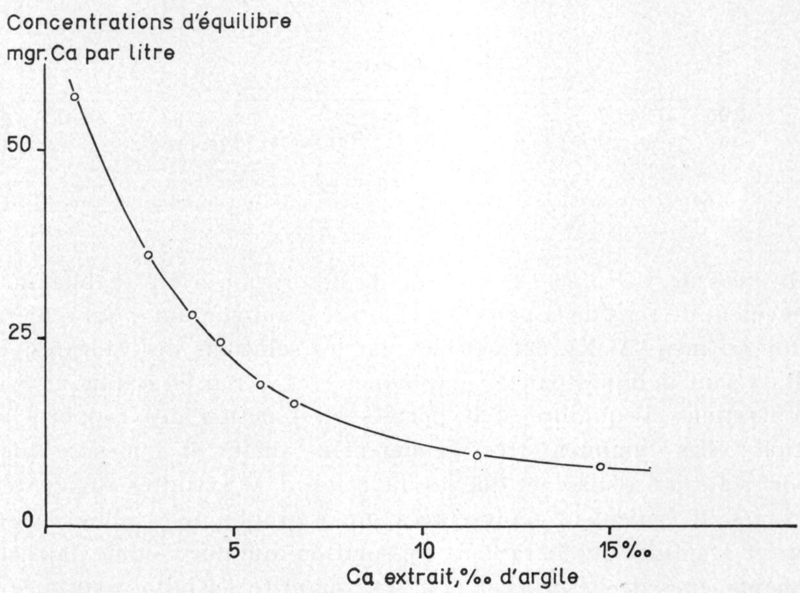
— à pH 5 : 17,8 méq./kg d'Al^{+++} extractible par Cl_2 Ba N, soit des teneurs tout à fait comparables à celles que nous avons rencontrées dans les sols argileux. La teneur en Al est plus faible à pH 5 qu'à pH 4,5 en raison de la précipitation intervenue entre ces deux pH. Notons d'ailleurs que la technique d'extraction rend bien compte de ce phénomène, et ne semble guère attaquer Al $(OH)_3$.

Les suspensions ont été ensuite diluées dans les solutions d'acétate

de calcium depuis les rapports argile/solution 1/20 jusqu'aux rapports 1/2 000, et l'aluminium a été dosé à l'équilibre dans la phase liquide. Le



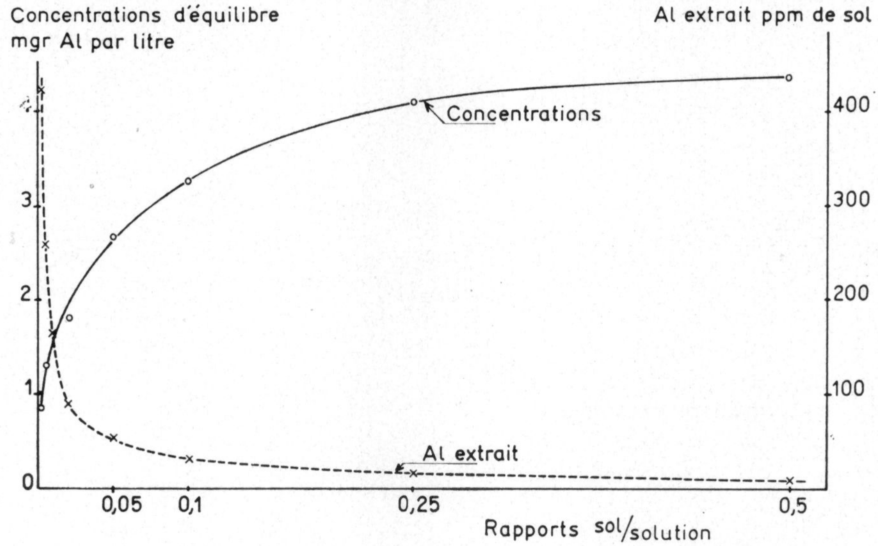
GRAPHIQUE 6. — Courbe de désorption de l'aluminium à partir de la montmorillonite.



GRAPHIQUE 7. — Courbe de désorption du calcium à partir de la montmorillonite.

graphique 6 représente les concentrations observées en fonction des quantités d'Al extraites.

Les deux courbes sont considérablement décalées l'une par rapport à l'autre, la solubilité de l'aluminium étant très faible à pH 5. Elles n'en ont pas moins l'une et l'autre très nettement la forme de courbes de désorption, telles que l'on peut les observer pour d'autres cations échangeables. Le graphique 7 indique précisément, à titre d'exemple, la courbe de désorption obtenue pour le calcium sur la même argile enrichie en cet élément, et épuisée par une solution d'acétate d'ammonium de même force ionique (26). L'aspect des deux courbes est identique ; l'aluminium échangeable obéit donc bien aux lois générales de l'adsorption.



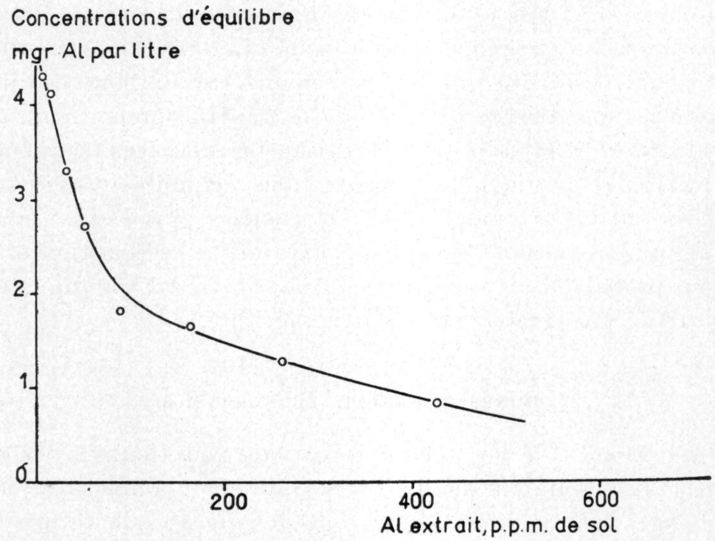
GRAPHIQUE 8. — Concentrations d'équilibre
et quantités d'Al extraites en fonction des rapports sol/solution, sol de Versailles

b) *Sols de Versailles*. La courbe de désorption a été établie sur le prélèvement de 1955 de la parcelle « chlorure d'ammonium », qui renferme environ 60 méq. Al/Kg extractibles par les solutions de chlorures. Les résultats sont indiqués par les graphiques 8 et 9. Sur le graphique 8, les concentrations d'équilibre sont portées en fonction des rapports sol/solution ; elles diminuent très régulièrement au fur et à mesure que le rapport sol/eau s'abaisse, et que les quantités d'Al extraites augmentent. Celles-ci sont également représentées sur le graphique 8 : elles croissent au fur et à mesure que le rapport sol/solution diminue comme dans tous les phénomènes de désorption (23). La quantité extraite, exprimée en p. p. m. de sol, est en effet le produit :

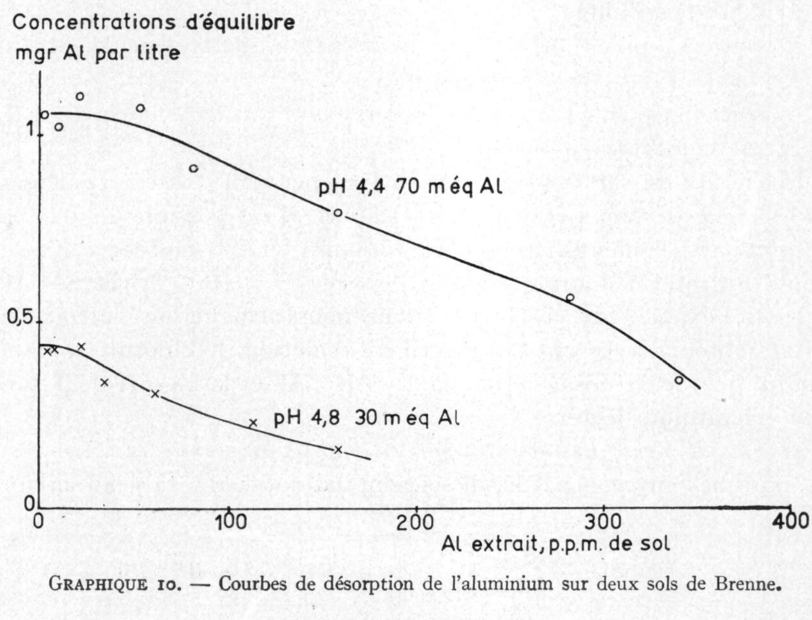
(concentration de la solution

× volume de solution se rapportant à un poids donné de terre),

et, lorsque l'on double le volume de solution, la concentration diminue de moins de la moitié de sa valeur initiale. C'est une caractéristique des



GRAPHIQUE 9. — Courbe de désorption de l'aluminium. Sol de Versailles.



GRAPHIQUE 10. — Courbes de désorption de l'aluminium sur deux sols de Brenne.

phénomènes de désorption. S'il s'agissait d'une dissolution, la concentration ne varierait en principe pas tant que la réserve de produit précipité serait suffisante.

Sur le graphique 9, les concentrations sont portées en fonction des quantités d'Al extraites, et l'on obtient une courbe de désorption sensiblement identique à celle qui a été réalisée à partir de la montmorillonite (graphique 6). Dans ce sol, l'aluminium considéré existe donc bien sous forme d'ions Al^{+++} échangeables, de même que dans la montmorillonite.

c) *Sols de Brenne.* Le graphique 10 représente les courbes obtenues sur deux de ces sols, l'un de pH 4,4, l'autre de pH 4,8, renfermant respectivement environ 70 et 30 méq. Al/Kg. Dans les deux cas, le phénomène de désorption n'est pas net : les concentrations d'équilibre restent voisines les unes des autres aux rapports sol/solution les plus élevés, puis elles diminuent progressivement. Les deux phénomènes, désorption et dissolution, sont probablement superposés dans ces terres. L'aluminium serait donc en partie échangeable, et en partie précipité.

2° Bilans de cations échangeables.

L'établissement de ces bilans de cations peut fournir des indications sur l'état de l'aluminium dans le sol. En effet, connaissant la capacité d'échange T, la Somme S des cations échangeables habituels $Ca^{++} + Mg^{++} + K^{+} + Na^{+}$, la teneur en ions H^{+} (dans la mesure où elle peut être considérée comme exacte) et la teneur en Al, on se trouve en principe devant deux possibilités :

— soit : $S + H^{+} + Al^{+++} = T$, et l'on peut admettre que Al se trouve sous la forme d'ions Al^{+++} échangeables.

— soit : $S + H^{+} = T$, et Al n'intervenant pas dans la capacité d'échange est considéré comme précipité.

En fait, des solutions intermédiaires peuvent exister également, dans lesquelles les deux états d'Al coexistent. Il est possible d'autre part qu'Al soit partiellement hydraté, de la forme $Al(OH)_n$. On observe ainsi des cas où T est intermédiaire entre les valeurs de $(S + H^{+} + Al)$ et $(S + H^{+})$.

Dans l'examen de ces bilans, nous nous attacherons surtout aux résultats obtenus avec un seul réactif d'extraction, le chlorure d'ammonium, qui permet le dosage à la fois de S, H^{+}, Al, et la mesure de T sur le même échantillon de terre.

a) *Sols de Versailles acidifié par les engrais ammoniacaux.* Les résultats, exprimés en méq. par Kg de sol, sont indiqués par le tableau suivant :

Année du prélèvement	Al	H^{+}	S	$S + H^{+} + Al$	T
1929	0	31,8	176	208	181
1933	0	40	135	175	175
1938	14,1	42,2	110	166	167
1945	29,2	40,1	80	149	158
1955	60	38,2	51	149	153

La somme ($S + H^+ + Al$) est sensiblement égale à T. L'aluminium peut donc être considéré comme échangeable au même titre que les autres cations, ainsi que l'indiquait déjà la courbe de désorption.

b) *Sols de Brenne*. Quelques exemples sont rapportés ci-après (extraction par NH_4 Cl) :

N°	Al	H^+	S	$S + H^+$	$S + H^+ + Al$	T
450-3.........	64,5	43,5	127	170,5	235	238
850-3.........	66	48	106	154	220	206
431-2.........	20	53	122	175	195	185
482-3.........	28	57,5	79	136,5	164,5	146
933-2.........	30	60	109	169	199	178

Parmi ces exemples, seul le numéro 1 paraît renfermer à l'état échangeable la totalité de l'aluminium extrait ($S + H^+ + Al^{+++} \neq T$). Dans les autres sols, T est compris entre ($S + H^+$) et ($S + H^+ + Al^{+++}$) ; cet aluminium semble donc se trouver en partie sous forme d'ions Al^{+++} échangeables, et en partie sous forme précipitée ou hydratée. Nous aboutissons ainsi aux mêmes conclusions qu'en considérant les courbes de désorption ou de dissolution.

Il en est de même si l'on envisage les résultats obtenus par les extractions utilisant les sels de baryum (chlorure de baryum pour Al, acétate de baryum pour H^+). Nous donnons toutefois un exemple montrant que l'on doit être très prudent dans l'interprétation du dosage des ions H^+ par percolation du sol avec la solution neutre d'acétate de baryum (méthode Parker) : les ions H^+ dosés préexistaient-ils réellement dans le sol, ou sont-ils apparus au moment de la précipitation d'ions Al^{+++}? La seconde hypothèse est beaucoup plus probable, comme en témoignent ces données relatives à un sol podzolique :

Horizon	T	S	Déficit T — S	A	H^+ totaux (méthode Parker)	H^+ échangeables (H^+ totaux — Al^{+++})
A_1..........	88	65	23	0	21,4	21,4
B_1g..........	149	79	80	43	70	27
B_2g..........	206	107	99	61	90,4	29,4

Le déficit (T — S) est bien sensiblement égal aux ions H^+ dosés selon la méthode Parker, mais sachant par ailleurs que ce sol renferme beaucoup d'aluminium labile, et que les solutions neutres de chlorures de baryum déplacent une forme d'Al qui a de fortes chances de se trouver à l'état échangeable, on peut être très sceptique quant à la validité du dosage. Dans le cas présent, il semble que la teneur réelle en ions H^+ échangeables soit peu éloignée de la différence (H^+ totaux — Al^{+++}).

3° Complexes colloïdaux de l'aluminium.

DEMOLON et BASTISSE ont montré l'existence de ces complexes (17), qui se forment avec la silice et éventuellement la matière organique. Nous avons constaté au cours de nos essais que de petites quantités supplémentaires d'aluminium apparaissent dans les extraits au cours d'un traitement provoquant la destruction des matières organiques et l'insolubilisation de la silice. Si ces teneurs sont suffisantes pour expliquer la migration de l'aluminium au cours des processus de pédogénèse, elles sont généralement beaucoup plus faibles que les quantités d'Al libre comprises dans l'acidité d'échange proprement dite.

En résumé, il ressort de ces données que l'aluminium de l'acidité d'échange peut se trouver intégralement à l'état Al^{+++} échangeable dans certains sols, surtout s'ils sont très acides. Dans beaucoup d'autres cas, il s'agit vraisemblablement d'un mélange de formes allant de Al^{+++} à $Al(OH)_3$. Les complexes organo-siliciques de l'aluminium ne paraissent pas quantitativement très importants.

C. — Conséquences de la présence d'aluminium

Parmi ces conséquences, nous rappelons seulement pour mémoire celle qui a trait à la difficulté du dosage exact des ions H^+, dont il a été fait mention ci-dessus. D'autres conséquences sont à envisager, notamment celles qui concernent la neutralisation du sol, la dynamique du phosphore, et une toxicité éventuelle à l'égard des plantes.

1° Neutralisation du sol et besoin en chaux.

Ce problème ne pose pas de grande difficulté : l'aluminium libre apparaissant dans les sols acides se comporte à cet égard comme des ions H^+, c'est-à-dire en accepteur d'ions OH^- qui conduisent à sa précipitation :

$$Al^{+++} + 3OH^- \xrightarrow{pH7} Al(OH)_3,$$

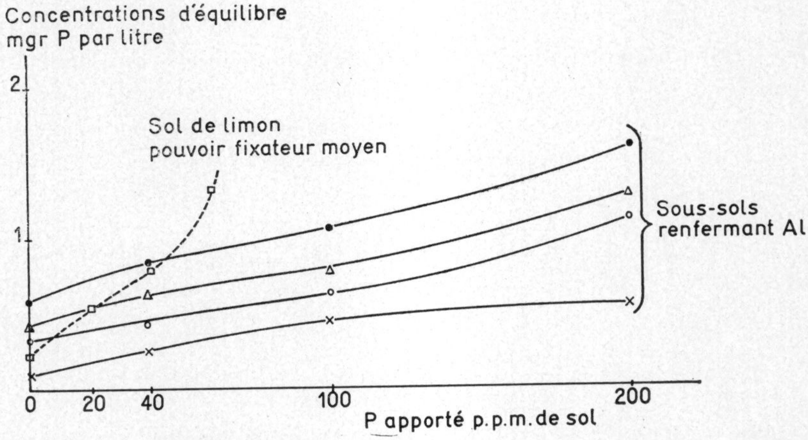
La difficulté de la distinction entre H^+ et Al^{+++} est donc ici plutôt théorique qu'appliquée : le besoin en chaux reste le même dans les deux cas.

2° Dynamique du phosphore.

L'aluminium est un facteur important du pouvoir adsorbant ou fixateur des sols envers les ions phosphoriques ; la fixation peut se faire par adsorption ou par précipitation, les deux phénomènes pouvant même coexister (27, 28). Bien qu'une étude détaillée de cette fixation n'ait pas

été faite sur les sols considérés ici, quelques grandes lignes apparaissent néanmoins :

a) le pouvoir fixateur des sols dans lesquels l'aluminium libre a été rencontré est très élevé ; sous cet aspect, le comportement de ces sols se rapproche de celui des terres fortement ferrugineuses ou latéritiques. L'aluminium n'est pas le seul facteur responsable de cette fixation, puisqu'il s'agit surtout de sous-sols très argileux et souvent ferrugineux ; certains sous-sols ont d'ailleurs un pouvoir fixateur du même ordre bien qu'ils ne renferment pas ou peu d'Al libre. Un fait mérite cependant d'être signalé : en l'absence d'apports de P, les concentrations des solutions du sol sont souvent relativement élevées (0,1 à 0,5 mgr P par litre), et des apports considérables de P ne les augmentent que très



GRAPHIQUE 11. — Variation des concentrations d'équilibre en P en fonction d'apports croissants de P dans des sous-sols contenant de l'aluminium labile. Comparaison à un sol de limon de pouvoir fixateur moyen.

peu (graphique 11), la représentation graphique ne fait pas apparaître des lignes incurvées comme dans le cas général (DEMOLON, BOISCHOT et LAJON, 29), mais sensiblement des droites de très faible pente (graphique 11). Ce fait conduit à penser que le P apporté est probablement retenu surtout sous une forme précipitée (comparer les graphiques 1 et 11), notamment à l'état des phosphates aluminiques.

b) Si l'on considère à la fois le pH et les concentrations en P et en Al des solutions du sol, on constate en effet que leurs valeurs sont sensiblement celles qui correspondent aux équilibres de précipitation d'un phosphate d'aluminium, la variscite $PO_4H_2Al(OH)_2$, dont la formation peut intervenir dans le sol (15, 16). Les concentrations trouvées sont de l'ordre de 0,1 à 1 mg/l Al et 0,1 à 0,5 mg/l P, ce qui permet, vers pH 4,5 à 5, la précipitation de la variscite (16). Le phosphate doit donc être

rangé parmi les formes précipitées d'aluminium que l'on peut rencontrer dans ces sols ; il ne semble pas toutefois s'y trouver avec une grande extension, car l'épuisement en P des mêmes terres fait nettement apparaître des courbes de désorption du phosphore et non des courbes de dissolution. Les précipitations se produisent vraisemblablement plutôt sous l'effet d'un apport massif d'ions PO_4 augmentant brusquement la concentration de la solution du sol (cas des manipulations se rapportant au graphique 11).

3° Toxicité à l'égard des plantes

Les travaux de MAGISTAD, PIERRE, VLAMIS... (13, 18, 30) ont montré que l'aluminium peut être toxique à l'égard des céréales, par exemple, lorsque la concentration en Al de la solution du sol atteint environ 1 mg/litre. Malgré les teneurs en Al élevées des terres, nous avons très rarement rencontré dans les solutions ou les eaux de drainage de ces sols des concentrations atteignant 1 mg/l, comme le montrent quelques exemples suivants (les extractions ont été faites dans une solution de $CaCl_2$ 0,002 N, correspondant à la force ionique des eaux de drainage) :

pH	Al, méq/Kg, extraction $BaCl_2N$	Solution du sol, mg/l Al, sol/solution = 1/4
3,8	21,5	0,2
3,8	54	0,13
4,1	115	0,02
4,1	66,5	0,15
4,3	25	0,22

Dans les eaux de drainage, les concentrations sont du même ordre ; elles augmentent légèrement si l'on effectue l'insolubilisation de la silice et la destruction de la matière organique, indiquant la présence de petites quantités d'Al complexées. La toxicité de l'aluminium ne semble donc pas à craindre dans ces sols, surtout en raison de la faible teneur en électrolytes de leurs solutions (13).

Cette conclusion est apparue également en considérant la croissance de jeunes plants d'orge cultivés en petits pots d'expériences sur trois sous-sols acides, dont l'un ne renferme pas d'Al libre. Tous les éléments nécessaires aux plantes avaient été apportés ; une série d'échantillons avait en outre été chaulée de façon à compenser le déficit de saturation (T — S). Les résultats sont les suivants :

pH du sol	Al, méq./Kg	Récolte en g.	
		Non chaulé	Chaulé
4,9	0	0,96	2,58
4,9	36	1,11	2,85
4,7	64	0,94	3,1

L'effet du chaulage a été massif, mais la toxicité propre de l'aluminium n'apparaît pas : la croissance a été sensiblement la même dans les trois sols non chaulés.

CONCLUSIONS.

Des quantités importantes d'aluminium très labile apparaissent dans les sols acides lorsque le pH et le degré de saturation sont suffisamment faibles (pH de l'ordre de 5, degré de saturation voisin de 60 p. 100). Cet aluminium est nettement distinct de celui qui constitue le réseau cristallin des argiles. Il peut être mis en évidence et dosé après le traitement du sol soit avec des solutions salines neutres mais non tamponnées, soit avec des solutions tamponnées modérément acides (pH 4). L'aluminium étant à pH 7 précipité à l'état d'hydroxyde, les solutions neutres tamponnées (acétates d'ammonium ou de baryum) ne le font généralement pas apparaître ; lorsqu'il existe dans le sol sous forme Al^{+++}, ces solutions entraînent la précipitation des ions Al^{+++} et ainsi la libération d'ions H^+ non préexistants dans le milieu. Inversement, des formes partiellement hydratées d'aluminium peuvent provoquer la fixation d'ions H^+ sous l'effet de l'abaissement du pH qui intervient lors de l'échange entre les cations d'une solution non tamponnée et les ions H^+ du sol.

La détermination de la nature de l'acidité d'échange, et en particulier le dosage des ions H^+, sont donc très difficiles dans des sols acides renfermant de l'aluminium labile. Les résultats apparemment les meilleurs nous ont été donnés par l'utilisation d'une solution normale et neutre de chlorure d'ammonium, qui permet le dosage de l'ensemble des éléments intervenant dans la capacité d'échange de cations.

D'après les bilans de cations échangeables établis par cette technique, l'aluminium extrait ainsi se trouve dans certains sols entièrement à l'état d'ions échangeables Al^{+++}. Dans d'autres cas, des formes précipitées ou partiellement hydratées existent également. L'examen des courbes de dissolution ou de désorption de l'aluminium conduit à la même conclusion.

Des précipitations de phosphates d'aluminium, notamment de variscite, peuvent intervenir dans ces sols acides, surtout sous l'effet d'un apport massif de phosphates solubles. Cet effet néfaste de l'aluminium est probablement le plus marqué, la toxicité à l'égard des plantes paraissant rarement à craindre dans des sols de faible teneur en électrolytes, pauvres en matière organique. Le chaulage est le meilleur moyen de remédier à la présence d'aluminium, mais il est difficile à réaliser lorsqu'il s'agit d'horizons profonds.

L'acidité d'échange est une donnée très complexe, et, si le besoin

en chaux peut être calculé d'après le déficit de saturation (T — S), celui-ci ne représente pas nécessairement des ions H^+ : il s'agit souvent d'un mélange d'ions H^+ et d'aluminium, dans lequel ce dernier peut être largement prédominant. On ne doit cependant pas conclure trop hâtivement que l'aluminium extrait par une solution neutre se trouve forcément à l'état d'ions Al^{+++} échangeables, ni, inversement, qu'un sol ne renferme pas d'Al lorsque les réactifs acétiques neutres utilisés habituellement ne le font pas apparaître.

RÉSUMÉ

L'action de diverses solutions salines sur des sols acides met en évidence des quantités importantes d'aluminium particulièrement labile, nettement distinct de celui qui constitue le réseau cristallin des argiles. Les conditions dans lesquelles apparait cette forme d'aluminium sont un pH inférieur à environ 5, et un degré de saturation en cations échangeables de l'ordre de 60 p. 100. Danx l'acidité d'échange de tels sols, l'aluminium est souvent largement prédominant par rapport aux ions H^+.

L'état de cet aluminium dans le sol est discuté en faisant appel aux bilans de cations échangeables et aux courbes de dissolution ou de désorption. Il se trouve dans certains cas entièrement à l'état d'ions Al^{+++} échangeables, sous des formes plus ou moins hydratées dans d'autres sols.

Les conséquences de la présence d'aluminium sont envisagées : difficulté du dosage des ions H^+, précipitations de phosphates aluminiques, et toxicité éventuelle à l'égard des plantes.

SUMMARY

Exchange acidity and free — or exchangeable — aluminium in soils.

The effect of various saline solutions on acid soils shows the presence of large amounts of very labile aluminium, clearly differring from the aluminium forming the crystal lattice of clays. Conditions leading to the appearance of this form of aluminium are a pH lower than 5 and an approximately 60 p. 100 saturation with exchangeable cations. In the exchange acidity of such soils, aluminium often greatly exceeds hydrogen ions.

The state of this aluminium in soils is discussed by using balances of exchangeable cations and curves of dissolution or desorption ; it sometimes occurs entirely in the form of exchangeable Al^{+++} ions, and in more or less hydrated forms in other soils.

The consequences of the presence of aluminium comprise difficulty in measuring H^+ ions, precipitation of aluminium phosphates, and possible toxicity to plants.

ZUSAMMENFASSUNG

Austauschsäure und freies oder austauschbares Bodenaluminium

Durch Einwirkung verschiedenartiger Salzlösungen auf saure Böden, treten beträchtliche Mengen besonders labiles Aluminium in Erscheinung, dass sich von demjenigen, welches aus kristallinischen Tongittern hervorgeht,

unumwunden unterscheidet. Die Bedingungen unter welchen diese Aluminiumform auftritt, bestehen in einem niedrigen bis zu 5 gelangenden pH-Wert sowie einem ungefähr 60-prozentigen Sättigungsgrad an austauschbaren Kationen. In der Austauschsäure solcher Böden, ist das Aluminium, gegenüber den H^+ -Ionen oftmals vorherrschend.

Der Zustand dieses Aluminiums im Boden wird erörtert, indem man sich auf die Bilanzen an austauschbaren Kationen sowie die Dissolutions- oder Desorptionskurven beruft. In gewissen Fällen, befindet es sich ausnahmslos in Form von austauschbaren Al^{+++}-Ionen, in anderen Böden unter mehr oder minder wassergebundenen Formen.

Die Folgen der Anwesenheit an Aluminium werden ins Auge gefasst : Schwierigkeit der H^+-Ionenbestimmung, Ausfällungen von Aluminiumphosphaten und etwaige Toxizität Pflanzen gegenüber.

Обменная кислотность и почвенный алюминий, свободный или заместимый.

Р. БЛЯНШЭ, С. ПЕРИГО, ШОМОН и Ж. НАДО. Агрономическая станция ШАТОРУ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Действие на кислые почвы различных растворов солей обнаруживает значительные количества алюминия осибенно подвижного, резко отличающегося от того, который составляет кристаллическую сеть глин. Условиями, в которых появляется эта форма алюминия, являются pH ниже приблизительно 5 и степень насыщенности обменными катионами порядка 60 %. В обменной кислотности таких почв, алюминий часто является широко доминирующим по отношенню к ионам H^+.

Обсуждено состояние этого алюминия в почве, основываясь на биланах обменных катионов и на кривых растворения и десорбции. Он находится, в некоторых случаях, полностью в состоянии ионов обменного Al^{+++}; в других почвах, в виде более или менее окислов.

Рассмотрены последствия присутствия алюминия : трудность определения ионов H^+, появление осадков фосфорнокислого алюминия и возможная ядовитость (= вредность) по отношению к растениям.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) GILLY (G.). — Acidité et Aluminium échangeables, *Ann. Agro.*, **5**, 677-689, 1958.

(2) METSON (A. J.). — Methods of chemical analysis for soil survey samples, New Zealand Dep. of Scient. and Ind. Res., Wellington, 105-106, 1956.

(3) TCHERNOV (V. A.). — De la nature de l'acidité du sol, C. *R.* 6e *Cong. Int. Sc. Sol*, Paris, vol. B, 547-555, 1956.

(4) GASTUCHE (C.). — L'aluminium libre en surface de la kaolinite, *Bull. Groupe Fr. des Argiles*, **9**, 49, 1957.

(5) LAUDELOUT (H.) et EECKMANN (J. P.). — La stabilité chimique des suspensions d'argile saturée par l'ion hydrogène, *Trans. Int. Soc. Soil Sc. II* et *IV Comm.*, **2**, 194-199, 1958.

(6) ALECHINE (S. N.). — L'état de sorption des ions d'hydrogène et d'aluminium dans le sol, *C. R. 6e Congr. Int. Sc. Sol*, Paris, Edition Moscou, 2e Comm., 138-150, 1956.
(7) YUAN (T. L.). — Determination of exchangeable hydrogen in soils by a titration method, *Soil Sc.*, **8**, 164-167, 1959.
(8) COLEMAN (N. T.), WEED (S. B.), Mc CRACKEN (R. J.). — Cation-exchange capacity and exchangeable cations in Piedmont Soils of North Carolina, *Soil Sc. Soc. Am. Proceed.*, **23**, 146-149, 1959.
(9) YUAN (T. L.) and FISKELL (J. G. A.). — Aluminium Studies, *Soil Sc. Soc. Am. Proceed.*, **23**, 202-206, 1959.
(10) LINDSAY (W. L.), PEECH (M.) and CLARK (J. S.). — Determination of aluminium ion activity in soil extracts, *Soil Sc. Soc. Am. Proceed.*, **23**, 266-270, 1959.
(11) Mc LEAN (E. O.), HEDDLESON (M. R.) and POST (G. J.). — Aluminium in soils, *Soil Sc. Soc. Am. Proceed.*, **23**, 289-292, 1959.
(12) BLEVINS (R. L.) and MASSEY (H. F.). — Effects of Soil pH and extractable Aluminium on Copper Uptake by plants, *Soil Sc. Soc. Am. Proceed.*, **23**, 296-299, 1959.
(13) RAGLAND (J. L.) and COLEMAN (N. T.). — The effect of Soil Solution Aluminium and Calcium on Root Growth, *Soil Sc. Soc. Am. Proceed.*, **23**, 355-357, 1959.
(14) CHARLOT (G.). — L'analyse qualitative et les réactions en solution, 4e éd., Masson, Paris, 84, 122, 133, 136, 175, 1957.
(15) BEAR (F. E.). — Chemistry of the soil, Reinhold Publ. Corp., New-York, 183-185, 1958.
(16) LINDSAY (W. L.), PEECH (M.) and CLARK (J. S.). — Solubility criteria for the existence of variscite in soils, *Soil Sc. Soc. Am. Proceed.*, **23**, 357-360, 1959.
(17) DEMOLON (A.) et BASTISSE (E. L.). — Sur quelques complexes colloïdaux du fer et de l'aluminium, *Ann. Agro*, **1**, 6-33, 1938.
(18) BLACK (C. A.). — Soil-Plant Relationships, Wiley and Sons, New-York, 129-143, 1957.
(19) VLAMIS (J..). — Acid Soil infertility as relate to soil-solution and solid-phase effects, *Soil Sc.*, **75**, 383-394, 1953.
(20) PERIGAUD (S.). — Généralités sur les sols de la Brenne, *Bull. Ass. Fr. Et. Sol*, **4**, 170-187, 1960.
(21) BRUNEL (A.). — Traité pratique de chimie végétale, Georges, Tourcoing, (France), t. II, 375, 1948.
(22) FRIED (M.) and SHAPIRO (R. E.). — Phosphate supply pattern of various soils, *Soil Sc. Soc. of Am. Proceed.*, **4**, 471-475, 1956.
(23) BLANCHET (R.). — Energie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes, *Ann. Agro.*, **1**, 5-52 et 125-153, 1959.
(24) CHARLOT (G.) et BEZIER (D.). — Analyse quantitative minérale, Masson, Paris, 379, 1955.
(25) SANDELL (E. B.). — Colorimetric determination of traces of metals, Intern. Publ., New-York, 228-231, 1959.
(26) BLANCHET (R.). — Energie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes, Thèse Doctorat, *Inst. Nat. Rech. Agro.*, Paris, 46-52, 1958.
(27) BLANCHET (R.). — Adsorption et dilution isotopique des ions phosphoriques au contact des hydroxydes métalliques et des argiles, *Ann. Agro.*, **3**, 55-74, 1960.
(28) WILLIAMS (E. G.), SCOTT (N. M.) and Mc DONALD (M. J). — Soil properties and phosphate sorption, J, *Sc. Food Agric.*, **9**, 551-559, 1958.
(29) DEMOLON (A.), BOISCHOT (P.) et LAJON (J.). — Réaction des divers sols

à l'apport des engrais phosphatés solubles, *Ann. Agro.*, **3**, 291-330, 1953.

(30) VLAMIS (J.). — Acid soil infertility as related to soil-solution and solid-phase effect, *Soil Sc.*, **75**, 383-394, 1953.

(31) MULLER (J.). — Échange des ions cuivriques sur les colloïdes minéraux. I — Phénomènes d'adsorption, *Ann. Agro.*, **1**, 93-112, 1960.

631. 425. 4.

ÉVALUATION DE LA STABILITÉ STRUCTURALE D'UN SOL (Indice S) NOUVELLES NORMES D'EMPLOI POUR L'APPAREIL A TAMISER

PAR

A. FEODOROFF (1)
Laboratoire de Techniques culturales,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles.

S

Introduction

NÉCESSITÉ D'UNE MISE AU POINT

L'évaluation de la stabilité structurale d'un sol exige l'établissement et la confrontation de deux indices : S et K. Les bases théoriques de l'établissement de ces indices ainsi que les modalités d'exécution ont été développées par les auteurs de la méthode (1).

Rappelons que l'établissement de l'indice S comporte entre autres opérations un tamisage de la terre sous l'eau. Dans la méthode originale, ce tamisage se faisait à la main. Ensuite on a pensé que, pour permettre une application plus étendue de la méthode, il était souhaitable de mécaniser cette opération et un appareil a été construit à cet effet (2). En même temps, on a fixé pour l'appareil des normes de fonctionnement telles que le tamisage mécanique donne des résultats pratiquement comparables à ceux précédemment obtenus à la main. Depuis, il s'est avéré, en étendant la gamme des terres étudiées, que ces normes ne donnaient pas la concordance la plus fidèle avec la méthode de tamisage à la main. Nous avons donc été amenés à aménager quelque peu ces normes, en particulier à réduire la prise initiale de terre à 5 g (au lieu de 10) et à porter le nombre de coups de tamis à 30 (au lieu de 20). Parallèlement, on a amélioré l'appareil lui-même en lui adaptant, pour la fixation plus rapide

(1) Avec la collaboration technique de J. OUDARD.

du tamis, une griffe mise au point par ANCELIN (S. A. S.). Nous profitons de cette mise au point nécessaire pour redonner la description de l'ensemble des opérations conduisant à l'établissement de l'indice S et pour cela il a été fait de larges emprunts aux descriptions données précédemment par les auteurs de la méthode (1). Il ne sera pas parlé de l'interprétation des résultats, traitée par ailleurs dans des mémoires originaux et dont l'essentiel est rassemblé dans « le Profil Cultural » (3).

I. Préparation de l'Échantillon

L'échantillon est prélevé avec précaution (loin du fer de la bêche) et transporté en emballages rigides. S'il est très humide, il est nécessaire de le manipuler avec soin. Ensuite, au laboratoire, la terre est séchée à l'air, en mottes.

L'échantillon moyen de terre sèche (200 g environ) comprenant des mottes de différentes dimensions et de la terre fine, est forcé à la main à travers un tamis de 2 *mm à mailles carrées*. Dans certains cas, il est impossible de briser les mottes à la main. On utilise alors un mortier et un pilon et on sépare au fur et à mesure la terre < 2 mm par des tamisages très fréquents. Il est recommandé d'utiliser pour cette opération un tamis de 10 cm de diamètre, avec des mailles en acier haute résistance, fil 1,4.

L'échantillon de terre ainsi préparé servira aussi bien pour la détermination de l'indice K que de l'indice S.

II. Indice S (dit d'agrégats) Différentes déterminations nécessaires

$$S = \frac{(A + L)_{max.}\ \%}{\dfrac{A_a + A_b + A_o}{3} - 0{,}9\ S.\ G.\ \%}.$$

(A + L) p. 100 = pourcentage d'éléments fins < 20 μ dans la suspension (sans agent dispersant). On retient la valeur maximum des trois prétraitements.

A_a = pourcentage d'agrégats stables (> 0,2 mm) après prétraitement à l'alcool éthylique.

A_b = pourcentage d'agrégats stables (> 0,2 mm) après prétraitement au benzène.

A_o = pourcentage d'agrégats stables (> 0,2 mm) sans prétraitement.

S. G. p. 100 = sables grossiers (> 0,2 mm).

III. Détermination du taux d'agrégats stables (A_a, A_b, A_o)

La détermination s'effectue par tamisage sous l'eau, soit à la main, soit mécaniquement à l'aide d'un appareil à tamiser. Le mode opératoire décrit ci-dessous concerne le tamisage mécanique.

A. — Principe et description de l'appareil (fig 1).

L'appareil imprime au tamis un mouvement hélicoïdal. En fait, il s'agit de deux mouvements qui se superposent : un mouvement de rotation, en va-et-vient autour de l'axe vertical du tamis, destiné à répartir les agrégats sur la toile et un mouvement en va-et-vient vertical destiné à faire passer les agrégats à travers les mailles du tamis. Pendant tout

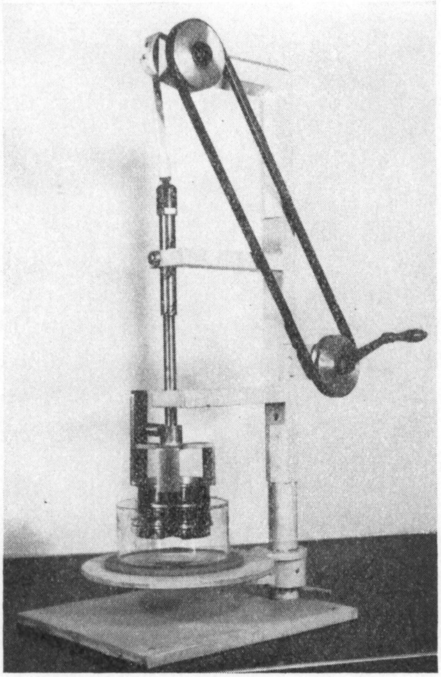


FIG. 1. — Appareil à tamiser en position de travail.

le mouvement le tamis baigne dans l'eau, mais au cours de chaque rotation complète il y a un moment où la toile du tamis affleure presque à la surface du liquide et les agrégats émergent partiellement.

Le mouvement de rotation est donné par un arbre vertical portant une rainure hélicoïdale et coulissant dans deux orifices-guides. Une butée fixée dans un des orifices-guides s'insère dans la rainure de l'arbre. Lorsque

l'arbre monte ou descend, la butée et la rainure hélicoïdale lui impriment un mouvement de rotation autour de son axe vertical. Le mouvement vertical est produit par un excentrique tournant dans un plan vertical et situé au-dessus de l'arbre. Ce mouvement est transmis à l'arbre par une bielle. L'ensemble est entraîné par une manivelle.

La profondeur de plongée est de 40 *mm. Les rotations sont de* 180° *dans chaque sens.*

Le tamis est fixé à la partie inférieure de l'arbre par une griffe (modèle ANCELIN) avec deux mâchoires rigides et une mâchoire mobile autour d'un axe vertical. Cette dernière est maintenue appliquée contre le tamis par un ressort spiral. Les trois mâchoires maintiennent le tamis d'une façon rigide en les serrant sous le bourrelet supérieur. Le tamis a un diamètre de 100 mm, une profondeur de 60 mm, et une ouverture de mailles de 0,2 mm.

On place et on enlève le tamis en dégageant vers l'extérieur la mâchoire mobile. Le cylindre du tamis sera échancré en plusieurs points de sa partie inférieure pour assurer une meilleure circulation de l'eau.

B. — Mise au point de l'appareil à tamiser.

Le tamisage se fait dans un cristallisoir (de préférence sans bec) de 145 à 150 mm de diamètre et de 80 mm de profondeur. Ce cristallisoir porte un repère correspondant à un niveau d'eau tel que la toile du tamis affleure au point mort haut. A cet effet, on ajuste le niveau de l'eau, puis on décroche le tamis, on le pose au fond du cristallisoir et on porte le repère (de façon à ce que la partie immergée du tamis soit la même qu'en D_2). Le cristallisoir repose sur un plateau mobile (fig. 2) autour de l'axe vertical de l'appareil. Entre le plateau et le cristallisoir on intercale un rond de caoutchouc mousse (dessous d'assiette), de 4 à 5 mm d'épaisseur et 150 mm de diamètre, destiné à amortir les chocs produits au moment du dégazage.

Cette mise au point est faite une fois pour toutes pour un matériel donné (appareil, cristallisoir, rond).

C. — Opérations préalables au tamisage.

— Échantillonage de la terre.
— Pesée.
— Prétraitements et attaque des échantillons.
— Agitation.

1° L'ÉCHANTILLONNAGE DE LA TERRE requiert un très grand soin.

En effet il conviendra de faire des prises relativement petites (5 g) qui devront être représentatives de l'ensemble de l'échantillon initial.

Pour ce faire on prend le récipient contenant l'échantillon de terre préparée (200 g) et on verse la terre dans un plateau en la faisant couler dans tous les sens. On évite ainsi de distribuer préférentiellement suivant la taille des agrégats. On obtient donc en fin de compte une couche de terre ne dépassant pas 1 cm d'épaisseur, et homogène dans les trois directions.

2° Pesée.

On pèse alors *trois fois* 5 g que l'on obtient en déposant sur le plateau d'une balance 4 ou 5 prises prélevées en des points différents de l'échantillon étalé.

Chaque échantillon de 5 g est déposé au fond d'un bécher de 250 cc, bien sec.

3° Prétraitement et attaque des échantillons

Dans le bécher n°1 la terre est humectée par 10 cc d'alcool éthylique. Dans le bécher n° 2 on ajoute 10 cc de benzène. Les deux opérations se font avec ménagement, en faisant couler lentement le liquide le long de la paroi du bécher. Le bécher n° 3 est brutalement rempli d'eau distillée. Au bout de 5 minutes, les béchers n° 1 et 2 sont également remplis d'eau.

L'ensemble est alors laissé au repos.

4° Agitation.

Au bout de 30 minutes, on transvase quantitativement le contenu du bécher dans un erlenmeyer de 750 cc sur lequel est marqué un repère à 300 cc. Pour cette opération on peut s'aider d'un jet de pissette dirigé de façon à ne pas détruire d'agrégats.

Le volume est amené à 300 cc, l'erlenmeyer bouché et on agite 20 fois par retournements. Chaque retournement comprend un mouvement aller et un mouvement retour effectués à la main avec le maximum d'énergie.

N. B. — Température de l'eau : on veille à ce que toutes ces opérations soient effectuées avec une eau au voisinage de 20° C.

D. — Tamisage.

1° Le plateau mobile, portant le cristallisoir et le tamis, est déporté par rapport à l'axe vertical de l'appareil (Fig. 2). La griffe est amenée au point mort haut.

2° Verser l'échantillon dans le tamis, en s'aidant d'un jet de pissette qui ne soit pas dirigé sur les agrégats contenus dans l'erlenmeyer.

3° Amener le niveau de l'eau un peu en dessous du repère en versant l'eau à l'extérieur du tamis. Tapoter le tamis contre le fond du cristallisoir pour chasser tout l'air (cessation de bulles). Amener avec précision le niveau de l'eau au repère. S'assurer qu'il est égalisé entre l'intérieur et l'extérieur du tamis (certaines terres colmatent le tamis et l'égalisation peut demander plusieurs secondes).

4° Replacer le plateau mobile dans l'axe de l'appareil. Descendre un peu la griffe de fixation et accrocher le tamis dans une position telle que sa toile immerge en plongée d'un centimètre environ.

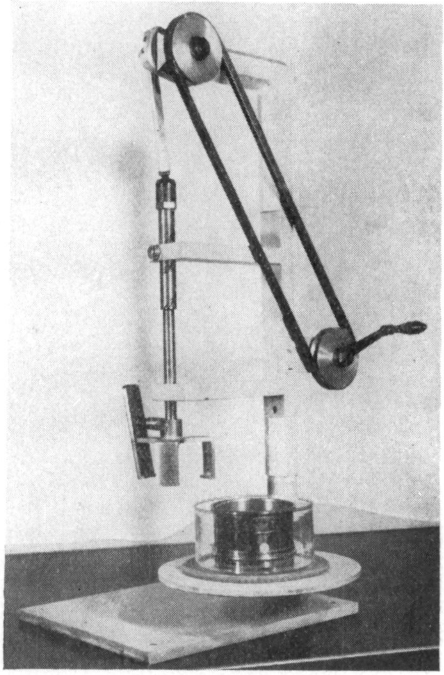


FIG. 2. — Appareil à tamiser en position d'approvisionnement.

5° S'assurer que le cristallisoir n'est pas excentré par rapport au tamis. Attendre que la surface de l'eau s'immobilise.

6° Tamiser en donnant 30 tours de manivelle en 30 secondes. Veiller à la régularité du mouvement. Commencer par le mouvement de plongée.

7° Arrêter le tamisage au point mort haut. Décrocher le tamis et le poser au fond du cristallisoir. Dégager le plateau mobile vers l'extérieur et recueillir les agrégats stables en les chassant avec un jet de pissette dans une capsule. Verser l'eau de décantation dans le cristallisoir.

8° Placer les capsules dans une étuve à 105°. Sécher jusqu'à poids constant (4 à 8 h de séchage).

9° Peser les agrégats séchés, et ramener au pourcentage de la prise initiale.

IV. Détermination du taux de sables grossiers S. G.

Remélanger après pesée les agrégats stables provenant des trois prétraitements de la même terre. Leur appliquer la même méthode de séparation des sables que pour l'analyse mécanique normale : attaque à l'eau oxygénée, saturation par KCl, lavages à l'eau jusqu'à dispersion, dispersion, tamisage à 0,2 mm.

V. Détermination du taux d'éléments fins (A + L) max. %

Cette détermination se fait sur le filtrat du tamisage resté dans le cristallisoir. Comme le tamisage se fait dans un volume d'eau compris entre 950 et 1 000 cc., il conviendra de prélever dans un volume de 1 200 cc (allonges à sédimentation avec trait de repère à 1 200 cc dans leur partie cylindrique). Le prélèvement se fera à la pipette de Robinson (par ex. à 10 cm de profondeur, et à 20° C, c'est au bout de 4'48'' après une agitation par retournement qui a duré 20 secondes environ).

Il s'agit d'obtenir le pourcentage d'éléments < 20 μ qui sont naturellement dispersés après les opérations de tamisage. Il est donc dénué de sens de remplacer cette mesure par le pourcentage d'argile et de limon (0 — 20 μ) obtenu par l'analyse mécanique.

Par ailleurs pour cette mesure on n'emploie pas d'*agent dispersant*. Ce n'est que dans le cas exceptionnel où une floculation s'observe pendant la sédimentation qu'on peut être amené à stabiliser la suspension. Pour le faire on ajoute, immédiatement avant la mise en sédimentation, 10 cc de citrate de soude normal et on fait un seul retournement. Dans ce cas on déduira le citrate après la pesée.

On peut dans la plupart des cas éviter de prélever la fraction argile + limon sur celui des trois échantillons qui a reçu le prétraitement à l'alcool éthylique. Le pourcentage maximum d'éléments < 20 μ est en effet obtenu dans la très grande généralité des cas sur l'échantillon prétraité au benzène ou éventuellement sur celui qui n'a subi aucun prétraitement.

VI. Exemple de calcul

	Alcool	Air	Benzène	Moyenne
	—	—	—	—
Agrégats % > 0,2 mm	64,5	46,1	23,8	44,8
Argile + Limon %	—	20,8	36,7	
Sables % > 0,2 mm	13,2			

$$S = \frac{36{,}7}{44{,}8 - 0{,}9 \times 13{,}2} = 1{,}11$$

L'indice S peut varier de 0,1 pour les terres riches en matière organique à plus de 100 pour les marnes ou les terres sodiques, (log 10 S variant ainsi de 0 à 3).

Résumé.

On décrit dans la présente note les modalités de l'évaluation de l'indice S de stabilité structurale des sols, suivant des normes de tamisage mécanique récemment améliorées, et qui remplacent celles qui ont été précédemment données.

Определение водопрочности почвенной структуры (*Индекс* S).

А. ФЕОДОРОВ (Новые нормы для просеивания механическим прибором).

РЕЗЮМЭ

Дается полное описание методики определения водопрочности структуры (Индекс S), с применением недавно улучшеных норм просеивания. Эти новые нормы заменяют те, что были установлены раньше.

SUMMARY

Estimation of the structural stability of soil (S value). **New norms for the use of Sieving apparatus**

The evaluation of the S value of structural stability of soils is described, according to recently improved norms of mechanical sieving, replacing previous instructions.

ZUSAMMENFASSUNG

Schätzung der Strukturfestigkeit des Bodens (S — Exponent). Neue Benützungsnormen der Siebmaschine.

In vorliegender Kurzmitteilung, werden die Modalitäten beschrieben, welche die zuvor angegebenen Normen zur Schätzung des S-Exponentes der Strukturfestigkeit der Böden, durch neuerdings verbesserte mechanische Siebungsnormen, ersetzen.

ANNEXE

— MATÉRIEL NÉCESSAIRE.

Appareil à tamiser. Modèle I. N. R. A., déposé.
Allonges à sédimentation de 1200 cc.
Cristallisoirs.

Pipette de Robinson.

Verrerie diverse de laboratoire (béchers 250 cc, capsules porcelaine et pyrex).

Étuve, bain-marie, balances...

Tamis très résistant pour la préparation de la terre.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Henin (S), Monnier (G.), Gombeau (A.). — Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agro.*, **1**, pp. 73-92, 1958.

(2) Feodoroff (A.). — Un appareil pour le tamisage de la terre sous l'eau. *Ann. Agro.*, **4**, pp. 537-448, 1958.

(3) Henin (S.), Feodoroff (A.), Gras (R.), Monnier (G.). Le Profil Cultural. S. E. I. A. Paris. 1 vol. 320 p. 1960.

631. 435. 3(44)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES LIMONS DES PLATEAUX DE LA FORET DE CHAUX

PAR

G. PLAISANCE
Administration des Eaux et Forêts,
Dole, (Jura).

et

H. W. Van der MAREL
Institut de Pédologie,
Wageningen, et Laboratoire de Mécanique des Sols,
Delft, (Pays-Bas).

ANALYSES PHYSIQUES, PHYSICO-CHIMIQUES ET CHIMIQUES

DEUXIÈME PARTIE

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

I. — Lieux de prélèvement des échantillons.

II. — Analyses physiques.

1° Dimension des particules, constantes d'Atterberg et surface spécifique.
2° Poids spécifique, volume des particules, densité apparente et volume des pores.
3° Perméabilité.
4° Rétention d'eau (pF).

III. — Analyses physico-chimiques.

1° pH, Eh et rH.
2° Bases échangeables et capacité d'échange de cations.

IV. — Analyses chimiques.

1° Perte au feu, humus et azote .
2° P_2O_5 organique.
3° Fixation de P.

4° Fixation de K.
5° Extraction avec HCl à 25 % de K_2O, CaO, MgO, Mn_3O_4, SiO_2, F_2O_3, Al_2O_3.

Résumé.

Remerciements.

Bibliographie.

Introduction.

Les sols à similigley décrits dans la première partie sont soumis à un lessivage horizontal appauvrissant (LAATSCH 1938, SCHNEIDER 1949, 1958, PLAISANCE 1953, 1956, HABIG 1953, KUBIENA 1953, PÉCROT et AVRIL 1958, MÜCKENHAUSEN 1958, RID 1958, ARENS et al. 1958). Une forte désintégration a lieu dans ce type de sol par suite de l'action des acides tanniques (LAATSCH, 1937), de dérivés des chélates métalliques (COPPER et RUDOLPH 1953, SCHATZ et al. 1954, etc.). Il y a en outre de fortes réductions dues au milieu organique pendant les périodes de saturation hydrique (BURROWS et CORDON 1936, BLOOMFIELD 1955, 1957, DE LONG et SCHNITZER 1955, SCHNITZER et DE LONG 1955, SCHNITZER 1959, LOSSAINT 1959, LAFOND 1950).

Par suite de cette désintégration et des lessivages (vertical et latéral) les sols à similigley sont donc, surtout les plus âgés, pauvres en substances nutritives pour les végétaux. D'autre part, ils contiennent beaucoup de concrétions ayant 0,5 cm et plus de diamètre. Dans le cas de grande altération sous le climat chaud des régions tropicales, on peut même, sur ce type de sol, trouver de vastes bancs durcis de concrétions ferromanganiques (VAN DER MAREL 1941, 1948).

Il était donc souhaitable que les analyses des sols à similigley de la forêt nous fournissent des détails sur leur degré d'altération et d'appauvrissement. Il faudrait savoir également si les endroits où la forêt a une croissance quelque peu meilleure (considérée localement comme « belle futaie ») possédaient, ou non, de meilleures propriétés chimiques et physiques initiales que les mauvais « vides » à molinie.

Nous avons comparé les caractéristiques des sols à similigley avec celles des loess, lehms, argiles... d'autres régions : nos résultats permettent de mieux « situer » ces sols jusqu'ici ignorés de la plupart des classifications pédologiques. Nous pouvons ainsi comparer les sols à similigley rencontrés en France.

Des données nous permettent également de les comparer avec les « sols à pseudogley » d'Allemagne et sols analogues d'autres pays. Nous espérons ainsi susciter de nouvelles mesures (en particulier caractéris-

tiques de Casagrande, Eh, rH, pF) sur des sols analogues. De ces mesures sortiront des comparaisons fructueuses. Ainsi les chercheurs pourront lever les incertitudes terminologiques et préparer une classification rationnelle de ces sols.

Il s'agissait également d'obtenir des précisions sur l'*influence du séchage* en ce qui concerne les mesures de pH et les analyses granulométriques. En effet, il est d'usage dans la plupart des laboratoires d'agronomie de dessécher d'abord les sols avant d'en analyser les caractéristiques bien qu'on sache que le séchage peut causer des réactions irréversibles. Mais on sèche néanmoins parce que les échantillons humides sont très difficiles à traiter pour déterminer P, K, etc.

D'autre part, il était intéressant d'étudier le comportement de ces sols après *ennoyage* puisque c'est la cause habituelle de leur dégradation. C'est pourquoi on a mesuré aussi Eh et rH. Les ingénieurs du Génie Civil et du Génie Rural ont en effet besoin pour leurs projets d'irrigation, de bâtiments, de remblais... en pays arides de connaître les nouvelles propriétés mécaniques des sols après submersion. Au contraire l'assèchement des polders exige l'étude après dessication de divers sols préalablement mouillés. Enfin, on sait qu'il y a une influence du pH et du rH du sol sur la corrosion des bâtiments ; il y a aussi l'influence des propriétés caractérisées par la granulométrie et les indices de Casagrande sur l'aptitude à supporter des routes et des bâtiments : les tableaux fournis ci-dessous aideront à définir le matériau constitué par ces sols.

I — Lieux de prélèvement

Le choix des échantillons a été fait en fonction de buts précis. Le tableau ci-dessous, dans sa dernière colonne indique ces buts.

Pour plusieurs échantillons il s'agit de couples dont il faut comparer les 2 termes pour dégager d'utiles conclusions (marbré/non marbré ; hêtraie/moliniaie ; charmaie/moliniaie...) : voir en particulier ceux de la maison forestière du Grand Contour, ceux de Fourg II, Chaux X, 751 ; Chaux XVI, 1338 et 1337.

Les sols furent prélevés dans leur état naturel sous forme de cylindres de 15 cm de haut et d'un diamètre d'environ 6,5 cm. Les cylindres d'acier utilisés pour l'échantillonnage furent paraffinés et clos immédiatement après pour prévenir toute évaporation. Ceci fut fait en hiver, à un moment où il n'avait pas gelé et après quelques jours de grandes pluies. De la sorte, l'humidité était la « capacité de champ » ou « capacité de drainage naturel », maximum d'eau pouvant faireéqu ilibre à la force de gravité (RICHARDS et MOORE, 1952 ; COLE et MATHEWS, 1954). On peut noter que pour la valeur de pF correspondante divers auteurs ont proposés comme valeurs pF 2,70 (0,52 atm.), pF 2,54 (0,34 atm) et pF 2,30 (0,19 atm).

– Description des échantillons –

Station	Peuplement	Sol	But
II 14	Vide à molinie avec quelques aunes et chênes en pommier, dans une légère dépression du plateau.	Horizon noirci en surface par la molinie et marbrures juste au-dessous de l'horizon humifère	Etude comparée des divers horizons d'un même profil de type assez courant
I 14	Peuplement clairiéré de chêne, hêtre, bouleau, avec molinie abondante. A été fréquemment incendié (en particulier en 1943).	On suppose que la dégradation du peuplement est due aux incendies plus qu'au sol (présence de bouleaux pionniers et de hêtres reliques); on suppose à priori que la restauration est aisée: en fait les semis et plantations de 1955 ont bien reussi.	– d° –
VIII 25	Très belle futaie chêne et hêtre.	Sol à 2 horizons: brun (50 cm) sur sous-sol marmoroïde. "Bon sol à similigley,sans transition	Etude comparée des horizons d'un même profil assez rare
III 1	Perchis de hêtre de conversion couvert dense depuis 100 ans.	Sol de qualité moyenne en voie d'amélioration.	Pour comparaison avec les sols à similigley sous taillis sous futaie
I 28	Belle futaie chêne et hêtre	Sol brun uniforme colluvial sur sous-sol brun plus dur.	Pour comparaison avec les sols à similigley
Fond d'étang	Non boisé	Fertile	Pour comparaison
Sol de prairie voisine de la forêt	Découvert	Sol humifère	Pour comparaison: effet des graminées
Monticule près Maison Forestière de Grand-Contour	Vide à molinie avec quelques aunes et chênes en pommier dans une légère dépression du plateau.	Néosol formé à partir d'un sous-sol marmorisé entaillé depuis 100 ans.	Vitesse et modalités de la regradation et du rebrunisement
Petit monticule d'ancien chablis	Néant	Sol restructuré et rebruni par suite du micro-drainage	– d° –
Terre de fourmilière	Néant	Sol divisé et enrichi en matière organique	Etude de sols regradés
Déjection de lombrics	Néant	– d° –	– d° –
Fourg. II Chaux X 751	Vide à molinie. Découvert Belle futaie de hêtre. Couvert assuré depuis 100 ans. Hêtre pur et serré depuis 50 ans, obtenue par simple vieillissement, Couvert complet	Sol tourbescent à similigley Sol à similigley analogue au précédent mais dont l'humus noir à disparu	Couple de deux sols du même plateau distants de 30 m séparées seulement par un chemin mais de productivité actuelle totalement différente.
Charmaie XVI parc. 1338 Moliniaie XVI parc. 1337	Charmes et trembles; bon couvert Découvert	Sol à similigley de plateau Sol tourbescent à similigley sur le même plateau dans une trouée voisine	couple de 2 sols distants de 20 m séparées seulement par une ligne séparative de coupes

II — 1 : Dimensions des particules, surface spécifique et constantes d'Atterberg.

Technique opératoire.

1° *Dimensions des particules.* 30 g de terre séchée pendant 2 heures à 110°C, sont mis en vase de verre, puis mêlés avec 3 g de nitrate de sodium et 1 000 cc d'eau. On remue pendant une demi-heure à l'aide d'un moteur à vibrations (1 000 tours environ par minute), On filtre sur treillis métallique de 90 microns, puis l'analyse granulométrique du filtrat est faite selon la méthode de l'aéromètre de Bouyoucos (1936, 1953).

2° *Surface spécifique.* Les échantillons doivent être préalablement séchés avec P_2O_5 sous 0,1 mm Hg. Il n'est donc pas possible de déterminer la surface spécifique du sol naturel.

On emploie le procédé Dyal-Hendricks (1950) : formation d'une couche monomoléculaire d'éthylène-glycol, quand le sol est saturé aupréalable par cette matière organique très polarisable et ensuite par enlèvement du surplus d'éthylène-glycol avec au-dessus du $CaCl_2$, sous 0,1 mm Hg. Ces analyses s'effectuent à une température constante (25°C).

3° *Constantes d'Atterberg.* La limite de liquidité (L. L.) et la limite de plasticité (L. P.) sont déterminées selon la méthode standard de Casagrande (1932). Dans la première analyse on ouvre une fente et on détermine par une série d'observations portées au graphique semi-logarithmique, le chiffre de Limite de Liquidité en prenant la teneur en eau du sol qui peut résister à 25 coups avant de se refermer. La Limite de Plasticité est déterminée par l'enroulement de l'argile humide sur un plateau de verre jusqu'à l'obtention de barres massives de 0,3 cm de diamètre. La différence entre la L. L. et la L. P. est l'Indice de plasticité I. P. Les mesures portent tant sur le sol naturel que sur celui séché pendant 2 heures à 110° C.

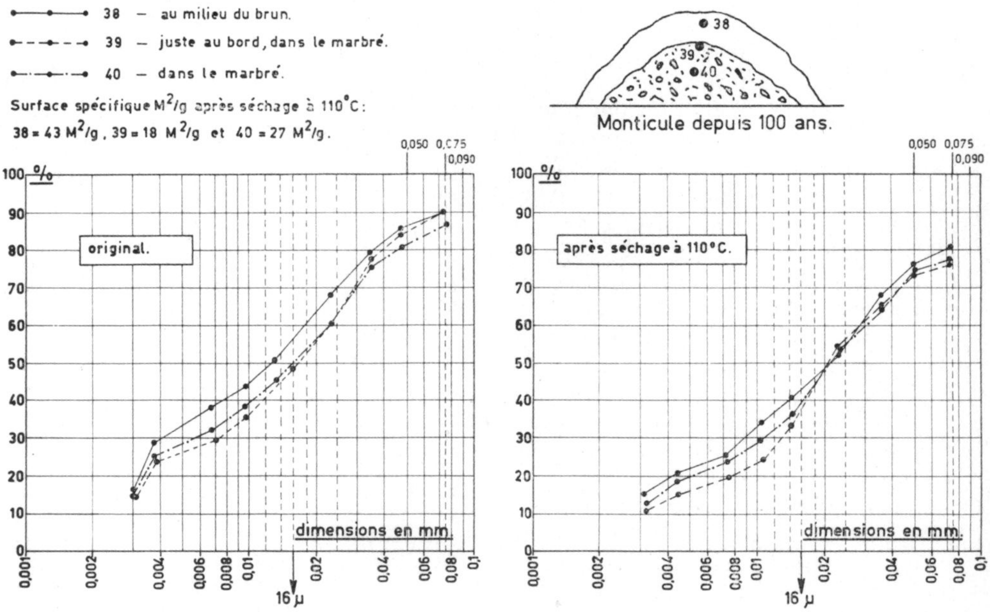
Tableau I

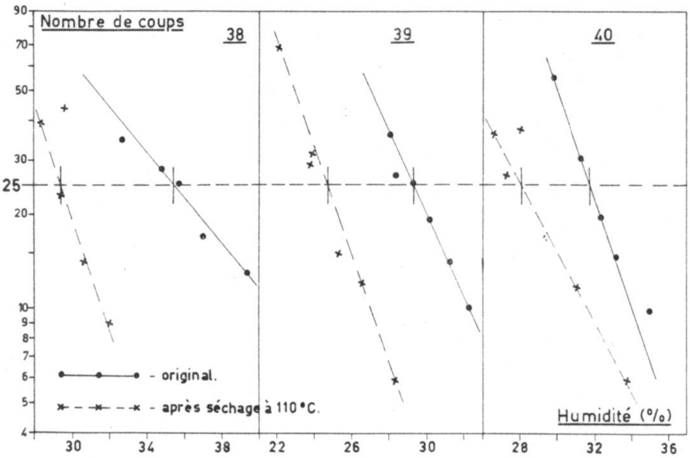
Constantes d'Atterberg, humus et surface spécifique.

No.	Description (profondeur en cm)		Lim. liq. %	Lim. plast. %	Ind. plast. %	Perte au feu %	Humus %	Surface spécif. M2 / g
19	Chaux x-751 (hêtraie)	15-25	39.8	21.6	18.2	4.80	3.02	28
20	- d° -	35-45	31.0	19.7	11.3	3.30	1.07	28
17	Fourg.II (moliniaie)	15-25	60.2	31.1	29.1	7.23	4.98	38
18	- d° -	35-45	35.0	20.2	14.8	3.79	1.61	33
33	XVI: 1 337 (charmaie) surf.		48.8	28.7	20.1	6.59	4.92	26
34	XVI: 1 338 (moliniaie) surf.		63.2	33.3	29.9	8.49	6.54	33
7	II/14 mauvais surf.		55.1	34.2	20.9	8.29	6.81	33
8	vide à molinie juste au dessus de la limite du marbré		36.0	22.0	14.0	3.63	2.24	20
9	juste en dessous de la limite du marbré		34.9	19.7	15.2	2.92	1.03	23
10	60 cm dans le marbré		60.1	26.1	34.0	5.16	0.88	53
29	Terre de fourmilière		46.2	27.8	18.4	6.50	4.88	40
32	Sol noir de prairie		50.2	25.9	24.3	12.01	3.86	49
37	Déjections de lombrics		72.3	43.0	29.3	10.46	8.33	40

Résultats.

La surface spécifique est *plus grande pour les échantillons plus humi-*





Original.

N°	38	39	40
Lim. liq. %	35,3	29,3	32,0
Lim. plast. %	21,3	20,8	21,3
Ind. plast. %	14,0	8,5	10,7
< 16 µ %	56	48	50

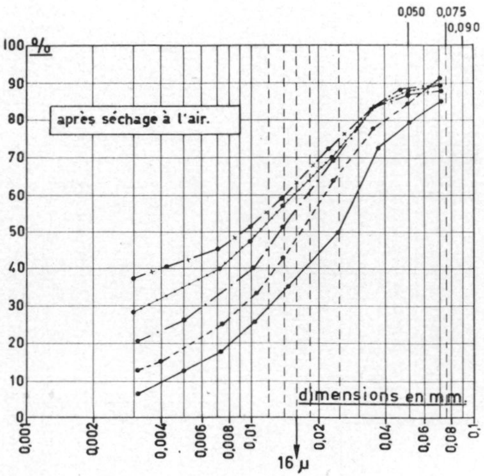
après séchage à 110 °C

N°	38	39	40
Lim. liq. %	29,2	24,7	28,2
Lim. plast. %	18,9	18,6	20,5
Ind. plast. %	10,3	6,1	7,7
< 16 µ %	43	38	39

FIG. 1. — Forêt de Chaux — M. F. Gr. Contour.

fères et pour ceux plus argileux. Il faut noter qu'elle est peu différente pour 2 échantillons voisins, l'un marbré, l'autre non marbré.

La figure 1 concerne un sol de monticule : le sous-sol marbré qui est exposé à l'air et en position de pente a donné, après 100 années un sol



			<16 μ %
374	Surface, brun gris.	0 - 15 cm	37
413	beige, faibles marbrures.	20 - 25 cm	48
375	marbrures plus contrastées.	40 - 45 cm	56
419	induré ocre avec quelques veines décolorées.	120 - 145 cm	61
395	induré ocre.	155 - 190 cm	62

	Original.						Après séchage à 110 °C.					
Nº	44	45	46	47	48	49	44	45	46	47	48	49
Lim. liq. %	36,3	31,6	29,7	37,7	41,2	43,7	26,5	23,4	23,5	32,8	38,5	40,8
Lim. plast. %	25,6	20,5	19,2	22,3	21,1	20,0	20,7	20,0	19,1	20,5	19,9	19,1
Ind. plast. %	10,7	11,1	10,5	15,4	20,1	23,7	5,8	3,4	4,4	12,3	18,6	21,7
Surface spécifique - M^2/g.							22	18	26	38	49	52

44 —	0-12 cm
45 —	12-15 cm
46 —	30-35 cm
47 —	50-55 cm
48 —	55-90 cm
49 —	130-135 cm

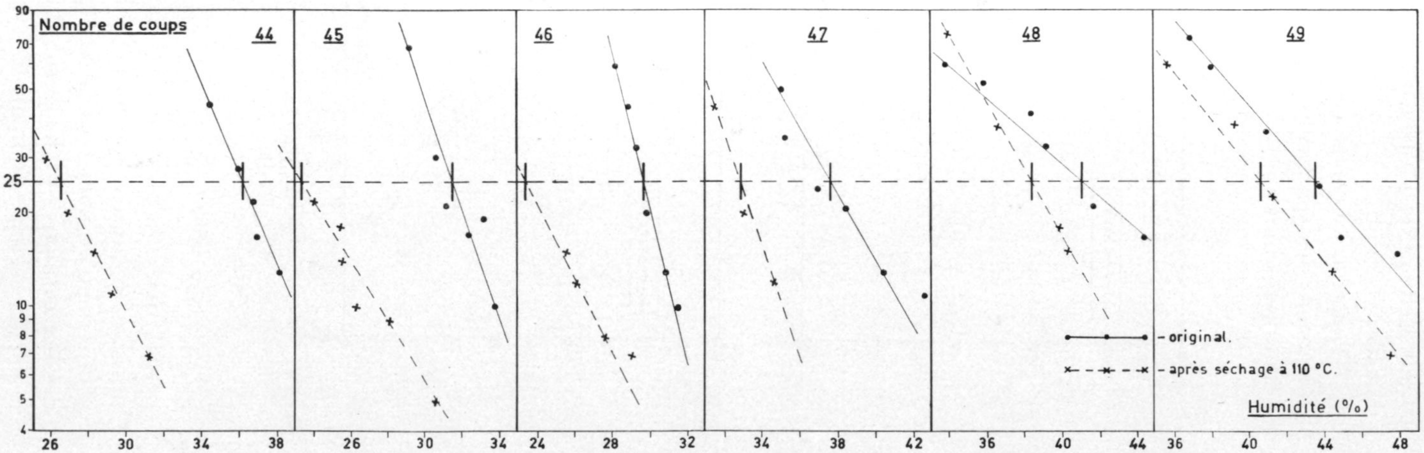


FIG. 2. — Parcelle 1/14 — avec peuplement de médiocre qualité, mais due aux incendies plutôt qu'au sol.

bruni. Celui-ci est un peu moins fin que le premier car il a perdu un peu d'argile.

Toutefois, si tous ces échantillons sont préalablement séchés, la dimension des particules diminue fortement ; toutes les constantes d'Atterberg diminuent également.

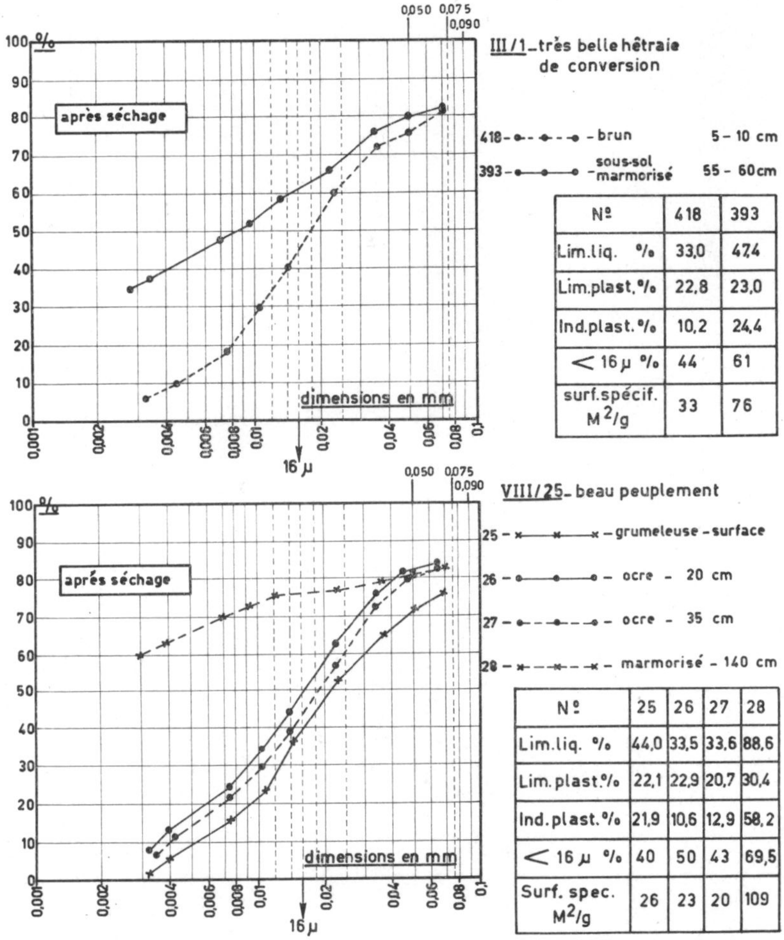
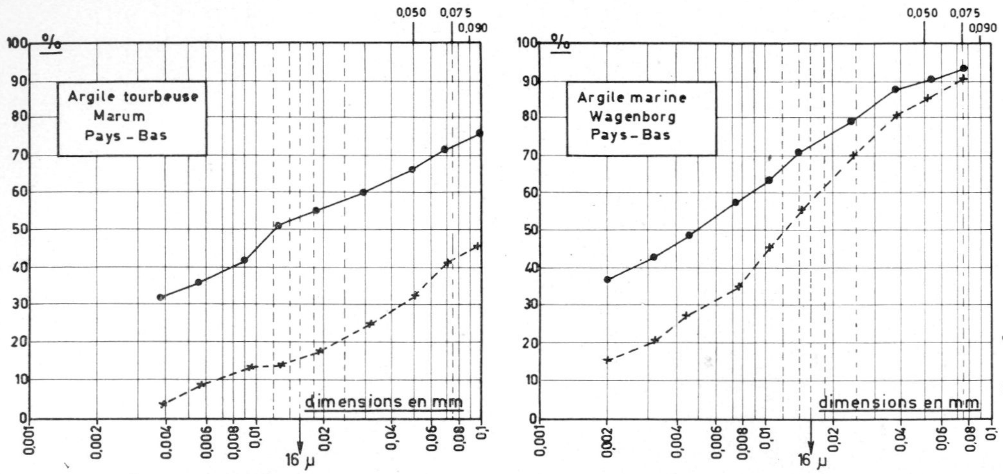


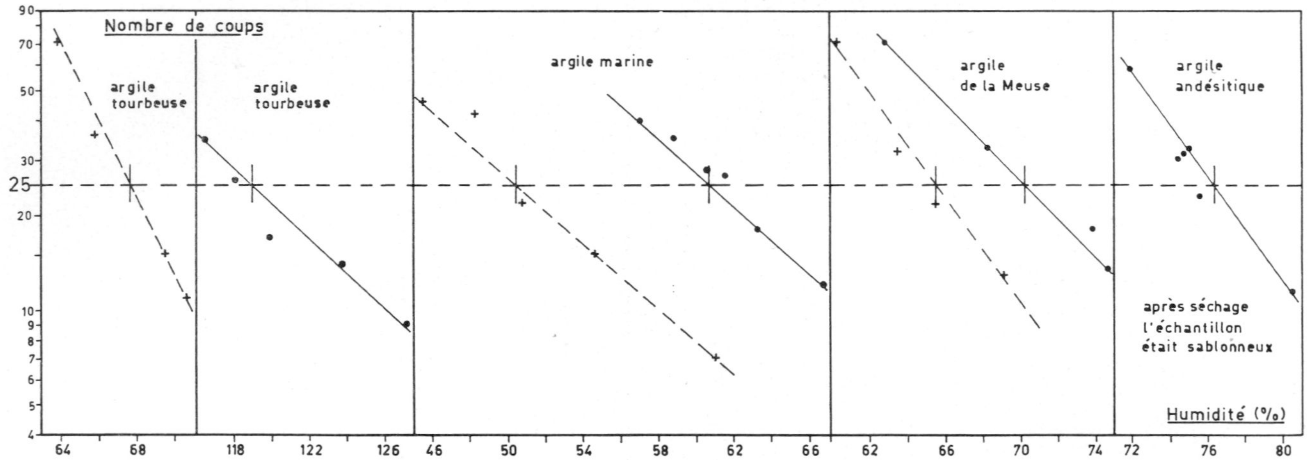
FIG. 4. — Parcelles III/1 et VIII/25 sur plateau avec sous-sol compact en profondeur.

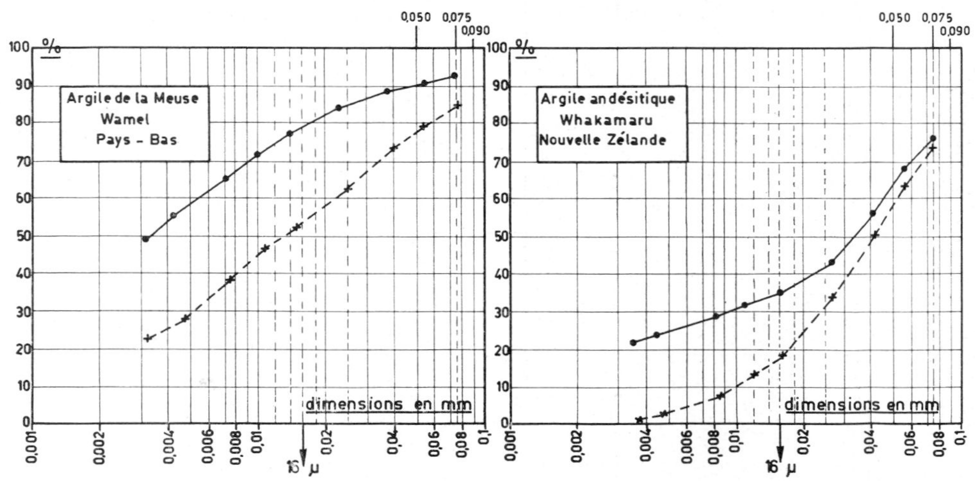
La figure 2 donne l'analyse d'un profil provenant d'une clairière de date récente, parcelle 1/14. La finesse du sol, les constantes d'ATTERBERG et la surface spécifique, *augmentent avec la profondeur.*

Ici encore nous constatons la forte influence d'un sèchage préalable des échantillons sur les résultats des analyses. La figure 3 représente l'effet du sèchage pour divers types de sols de l'étranger. Il y en a qui, comme l'argile contenant de l'allophane, deviennent sablonneux après



	Argile tourbeuse		Argile marine	
	orig.	séch.	orig.	séch.
Lim. liq. %	119,0	69,5	60,8	50,2
Lim. plast. %	77,5	55,5	31,4	31,0
Ind. plast. %	41,5	14,0	29,4	19,2
< 16 µ %	53,5	15,0	72,5	57,0
Surf. spec. M²/g	185		155	



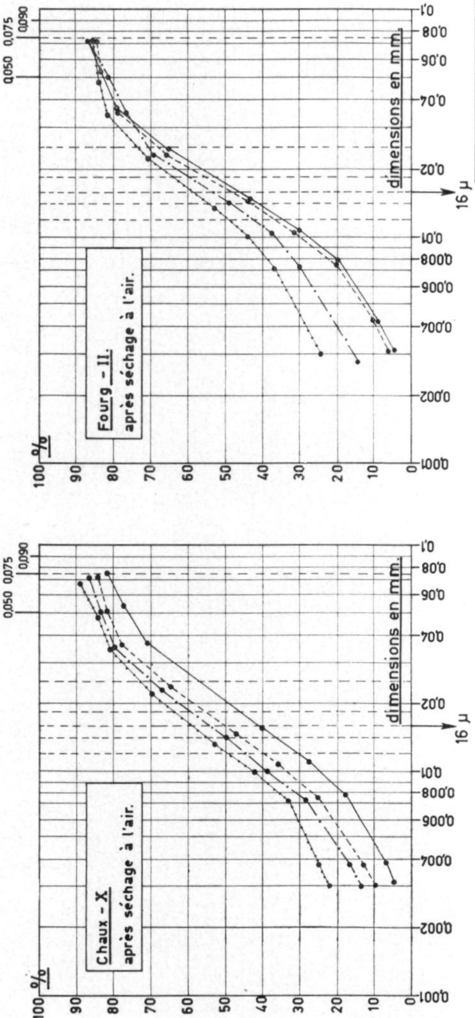


	Argile de la Meuse		Argile andésitique	
	orig.	séch.	orig.	séch.
Lim. liq. %	70,2	65,6	76,3	—
Lim. plast. %	37,7	40,4	52,9	—
Ind. plast. %	32,5	25,2	23,4	—
< 16 µ %	79,0	53,5	34,5	17,4
Surf. spec. M²/g	195		158	

FIG. 3. — Dimensions de particules et constantes d'Atterberg de divers sols de l'étranger analysés en leur condition originale et aussi après séchage, 1 heure à 110° C.

le sèchage (Birrell, 1952). De même pour l'argile tourbeuse des Pays-Bas (voir aussi Casagrande 1932, 1947).

La figure 4 montre les analyses provenant des parcelles III/1 et



			Lim. liq. %	Lim. plast. %	Ind. plast. %	< 16 µ %	Surface spécifique M²/g
Chaux-X	433 — 0 - 20 cm	brun gris, structure grumeleuse	39,6	30,6	9,0	41	36
	434 — 20 - 40 cm	gris beige clair décoloré, structure fondue	30,5	24,5	6,0	50	30
	435 — 40 - 60 cm	avec marbrures et dur	28,6	19,9	8,7	54	26
	436 — 60 - 80 cm	ocre, induré, avec décolorations très localisées	30,7	21,7	9,0	59	33
Fourg-II	437 — 0 - 20 cm	gris noir, structure grumeleuse	44,2	34,9	9,3	46	46
	438 — 20 - 40 cm	gris, très pâle, structure fondue	39,2	27,3	11 9	48	40
	439 — 40 - 60 cm	avec marbrures et dur	29,9	21,7	8,2	53	32
	440 — 60 - 80 cm	ocre avec décolorations très localisées	35,6	21,9	13,7	58	38

Fig. 5. — ***Chaux-X* avec bonne hêtraie et *Fourg-II* avec molinie** ; les deux parcelles de part et d'autre d'une sommière.

VIII /25 avec très belle futaie de chênes et de hêtres située sur petits plateaux : en profondeur de fines argiles compactes forment barrage pour l'eau ; ils ont environ 30 à 50 p. 100 d'éléments inférieurs à 2 microns et 60 à 75 p. 100 inférieurs à 16 microns ; leur surface spécifique est

d'environ 75 à 110 m^2/g. Dans les deux cas on pressent qu'il y a deux matériaux différents superposés, l'inférieur, en dessous de 40 cm, plus argileux.

Dans la figure 5 *on ne remarque guère de différences significatives* dans les analyses granulométriques des deux parcelles. La présence de la molinie dans Fourg II doit être donc causée ici par d'anciens incendies : elle s'est immédiatement emparée du sol, favorisée par le retour des coupes de taillis ; elle a empêché la restauration naturelle de la forêt qui s'est effectuée dans la parcelle Chaux 751 convertie en futaie. La différence dans les constantes d'Atterberg est encore plus grande pour les échentillons originaux.

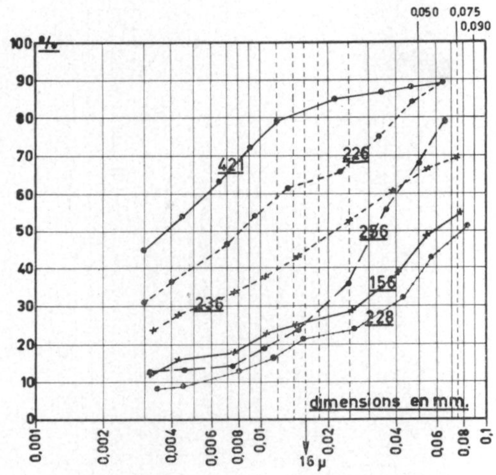
Mêmes résultats pour les deux parcelles adjacentes 1337 et 1338 l'une avec charmaie et l'autre avec moliniaie.

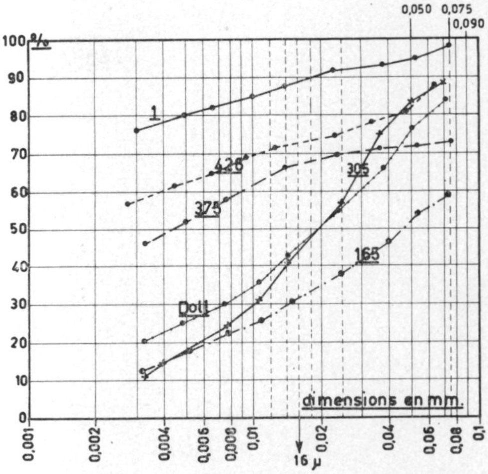
On trouve de grandes valeurs pour les constantes d'Atterberg du sol de fourmillières, du sol noir de prairie et des déjections de lombrics (sols beaucoup plus riches en matière organique que les sols ordinaires de la forêt).

La figure 6 montre, à titre comparatif, l'analyse granulométrique de quelques autres dépôts sédimentaires. Tous les loess sont caractérisés par une pente rapide dans la fraction de 50 à 80 microns. Il en est de même des anciens loess de Croissy et des Ecrennes. Dans les argiles alluviales fines de l'étranger ainsi que dans les limons très fins de forêt où les fractions grossières font défaut la pente est plus faible que dans un matériel trié.

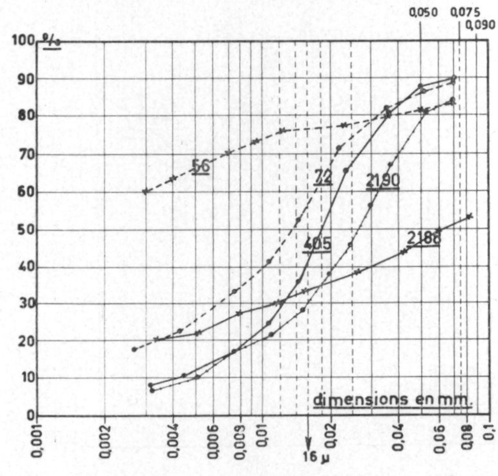
Par contre, les dépôts glaciaires (n° 375) ou colluviaux, fins ou lourds qui possèdent du matériel grossier montrent une courbure inverse. A en juger par les courbes granulométriques, l'argile compacte qui se trouve en profondeur sous le plateau de la forêt de Chaux semble aussi fine que celle « argile margalite » (Java) et « gumbosol » (Amérique). Mais ces sols sont composés de particules plus fines et possèdent tous une surface spécifique d'environ 200 à 300 m^2/g, tandis que celle de l'argile lourde du sous-sol de la Forêt de Chaux est d'environ 100 m^2/g.

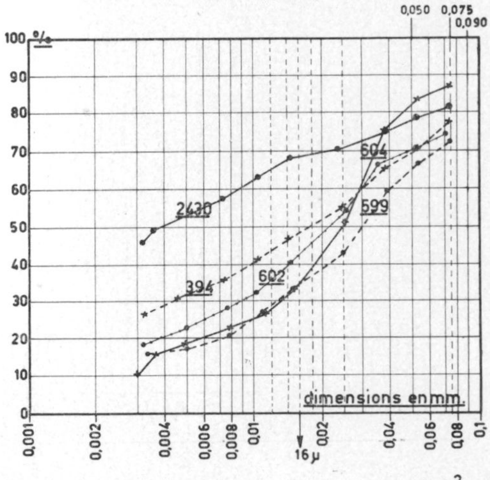
La figure 7 montre la relation entre la limite de liquidité et celle de la plasticité de divers sols. On y voit que les argiles lourdes et compactes de la forêt de Chaux se situent en dehors de la ligne A de CASAGRANDE (1947). Il faut donc les considérer comme des sols plastiques qui contiennent habituellement, en quantité plus ou moins grande, des argiles gonflantes (montmorillonite de sol ou illite ouverte). Les argiles de montmorillonite pure se situent beaucoup plus haut que cette ligne A.





421	– tir gris – S.Moh.b.Monsour, Maroc	142 M²/g.	1	– argile marine – Volkerak, Pays-Bas	165 M²/g.
226	– argile marine – Beemster, Pays-Bas	86 M²/g.	426	– terra rossa – Rochefort, France	65 M²/g.
256	– loess – Klinkert, Pays-Bas	36 M²/g.	305	– argile alluviale Meuse – Limbourg, Pays-Bas	86 M²/g.
236	– terra fusca – Limburg, Pays-Bas	112 M²/g.	375	– limon glaciaire Mirdum, Pays-Bas	53 M²/g.
156	– limon marin – Braak, Pays-Bas	66 M²/g.	Doll	– limon marin – Dollard, Pays-Bas	98 M²/g.
228	– limon marin – Wieringermeer, Pays-Bas	56 M²/g.	165	– limon de la Meuse – Limbourg, Pays-Bas	33 M²/g.





56	– sous-sol argileux – Dôle VIII/25, France	119 M²/g.	604	– loess – Lieusaint, France	48 M²/g.
72	– loess – Irak	92 M²/g.	2430	– argile margalite – Ngawi, Java, Indonésie	317 M²/g.
2190	– loess – Hannover, Allemagne	73 M²/g.	599	– limon – Croissy-s-Eure, France	49 M²/g.
405	– loess – Aspach Le Bas, France	53 M²/g.	602	– limon – Les Ecrennes, France	46 M²/g.
2188	– fond d'Etang – Bresse Jura, France	59 M²/g.	394	– terra fusca – Ougney, France	115 M²/g.

FIG. 6. — Dimensions des particules de divers types de sol de l'étranger et de l'argile la plus fine de la Forêt de Chaux.

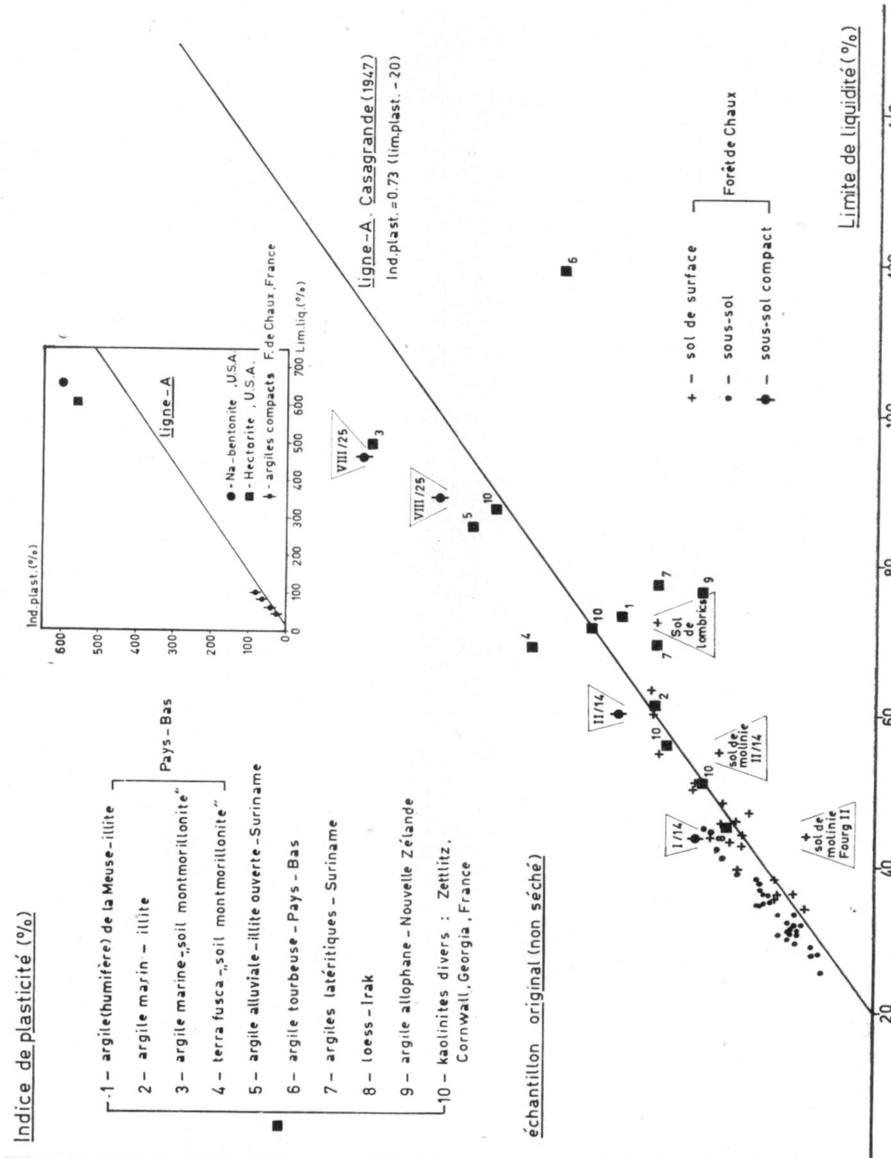


FIG. 7. — Indice de plasticité et limite de liquidité de divers sols de la Forêt de Chaux et d'autres types de sols de l'étranger.

II — 2 : Densité apparente :

Technique opératoire :

Le poids spécifique du sol original est déterminé selon la méthode du benzol sous vide à 6 mm Hg. On coupe ensuite au couteau, dans l'échantillon d'origine, un cylindre, de 6,2 cm de diamètre et de 2 cm d'épaisseur. Ce cylindre

est pesé sur une balance et le poids permet de calculer le volume spécifique de l'échantillon original. Partant du poids spécifique et du volume spécifique, on calcule ensuite le volume des pores du sol.

Résultats (tableau 2) :

DENSITÉ APPARENTE : L'analyse montre qu'avec la profondeur, elle augmente de 1,5 à 1,9 ; ainsi que le volume de matière minérale (51 p. 100 à 59 p. 100) et le poids spécifique des particules de sol (2,6 à 2,7). La cause en est la diminution de matière organique avec la profondeur.

Les sols de moliniaie, qui sont riches en matières organiques, se distinguent par des teneurs en matières minérales beaucoup moins élevées que les sols voisins avec belle futaie.

Pas de différence appréciable entre les échantillons marbrés et non marbrés voisins.

VOLUME DES PORES :

Il y a forte diminution du volume des pores avec la profondeur ; 55 p. 100 à 47 p. 100 ; les sols de moliniaie se distinguent par un volume de pores beaucoup plus élevé (61 p. 100)que les sols voisins avec belle futaie (53 p. 100).

EAU DU SOL :

On a considéré spécialement la quantité d'eau liée au point d'humidité équivalente (pF 3). En multipliant le volume des particules par leur poids spécifique on obtient le poids des particules de sol. Ce poids multiplié par le pourcentage d'eau (en p. 100) présent dans le sol à un pF 3, donne l'eau liée au sol à pF 3.

En déduisant du volume total des pores le volume de l'eau liée à un pF 3, on obtient le volume de pores dans le sol où l'eau se déplace aisément sous l'influence d'une force inférieure à celle de la pesanteur. On constate que le volume ainsi obtenu (volume de pores « libres » correspondant à l'eau mobile ») diminue avec la profondeur. Pour tous les sous-sols fins et lourds, on trouve même de grandes valeurs négatives : ceci est dû à ce que l'eau située tout près de la surface des particules de sol possède un poids spécifique plus élevé que 1. BOUYOUCOS a, dès 1921 attiré l'attention sur ce phénomène. La densité trouvée pour l'eau liée dépend, en effet, de la teneur en eau de l'échantillon. On a déterminé la densité moyenne d'un certain nombre de couches d'eau, elles varient selon la distance entre la couche étudiée et la surface : TSCHAPEK 1934 ; DE WIT et ARENS 1950 ; MACKENZIE 1958 ; RESPONDEK trouva même en 1958 pour de très basses d'humidité — quelques unités pour cent seulement — des densités de l'eau liée allant jusqu'à 1,85.

Les diverses analyses montrent que le volume des pores libres des sols de surface (qui sont riches en matière organique) est plus élevé ; ceci est plus marqué dans la moliniaie que dans les autres sols, mais on verra plus loin qu'il ne faut pas en tirer de conséquences erronées sur la qualité de ces derniers sols.

II — 3 : Perméabilité.

Technique opératoire :

Le sol est prélevé en place dans un cylindre métallique de 6,3 cm de diamètre et de 2 cm d'épaisseur. On mesure le volume des pores et met dans un cylindre métallique de diamètre 5,9 cm et de même épaisseur que celui de l'appareil de mesure de perméabilité. Pour empêcher l'écoulement d'eau entre

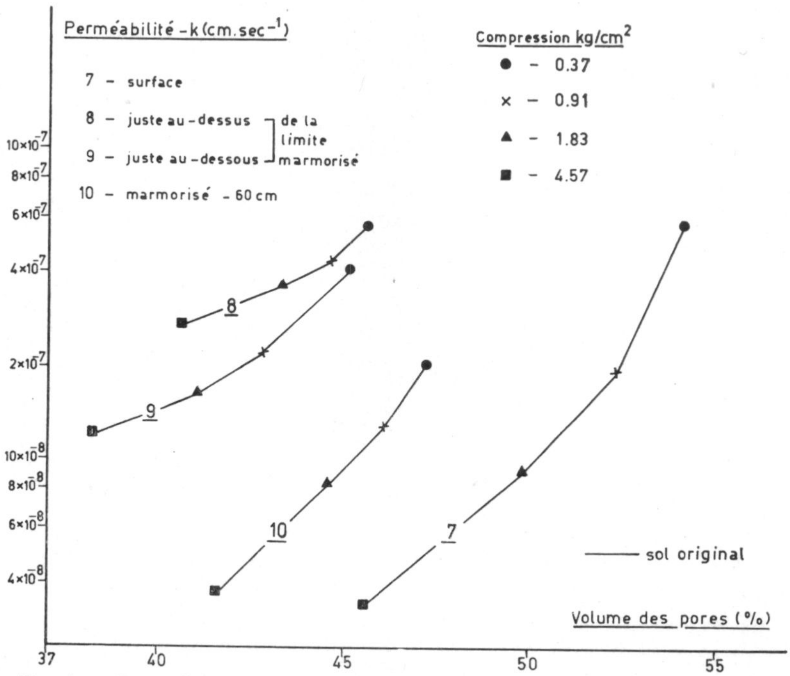


FIG. 8. — Perméabilité (cm. sec.$^{-1}$) et volume des pores (%) de la parcelle II/14 mauvais vide à molinie sur sol à similigley.

l'échantillon de sol et la paroi métallique du cylindre du perméamètre, la fente de quelques millimètres est remplie de colle forte.

On détermine la perméabilité des sols par la méthode avec niveau et pression variable : une colonne d'eau d'une certaine hauteur s'écoule à travers le sol sous l'influence de la pesanteur ; il y a une diminution de vitesse du courant qu'on note et d'où on déduit k. Il existe la relation différentielle $\frac{1}{h}\frac{dh}{dt} = \frac{-k\pi R^2}{d}\frac{1}{\pi r^2}$ ce qui donne par intégration entre les limites t_2 et t_1

k (perméabilité en cm/sec^{-1}) $= \dfrac{2{,}3 \ d\pi r^2 \ \log \dfrac{h_1}{h_2}}{\pi R^2 \ (t_2 - t_1)}$ dans laquelle d = hauteur du

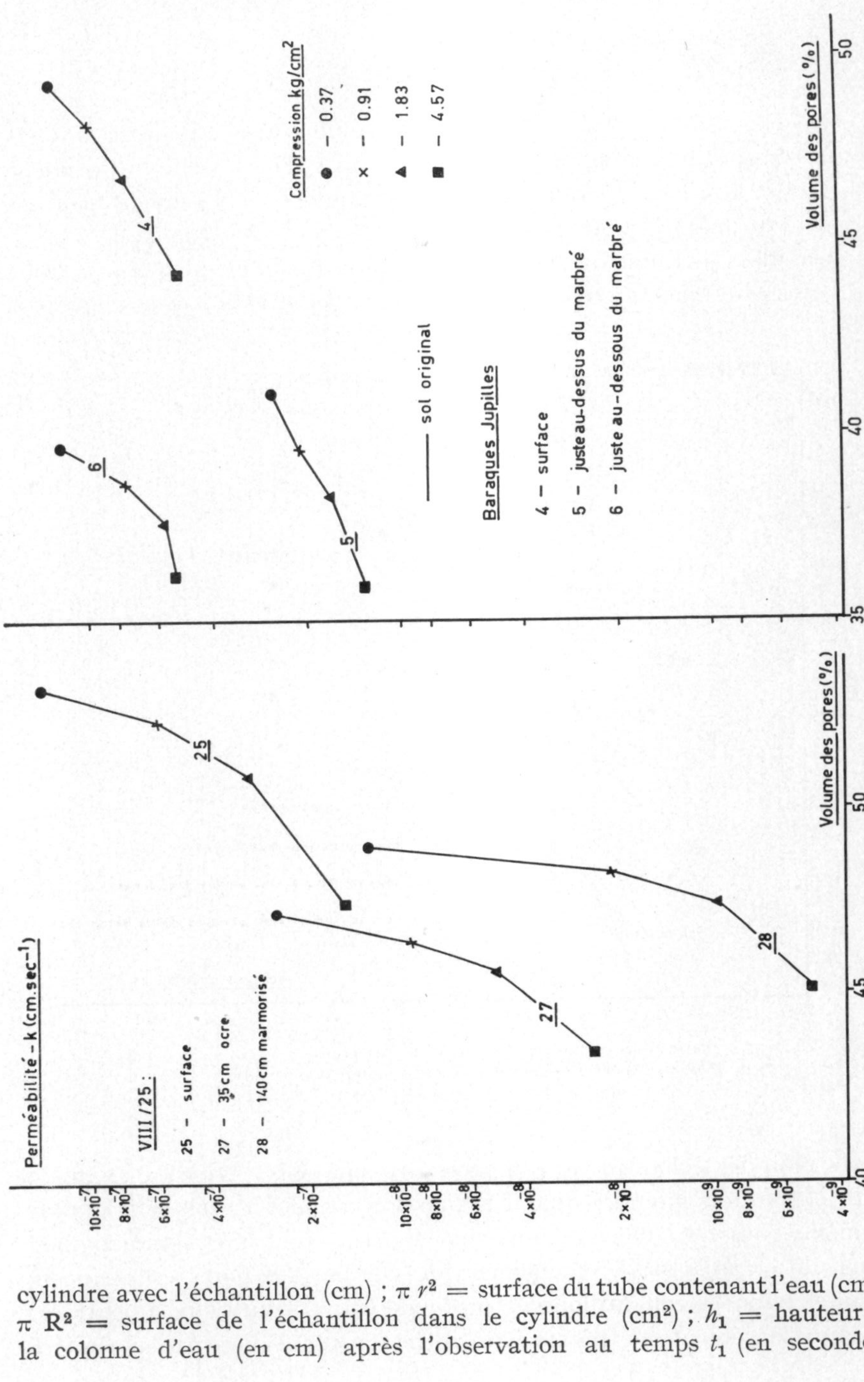


FIG. 9. — Perméabilité (cm. sec⁻) et volume des pores (%) de parcelles VIII/25 (avec très belle futaie) et Baraques Jupilles (avec belle futaie artificielle de chêne sur sol de plateau marmorisé en profondeur).

cylindre avec l'échantillon (cm) ; πr^2 = surface du tube contenant l'eau (cm^2) ; πR^2 = surface de l'échantillon dans le cylindre (cm^2) ; h_1 = hauteur de la colonne d'eau (en cm) après l'observation au temps t_1 (en secondes) ;

h_2 = hauteur de la colonne d'eau (en cm) après l'observation au temps t_2. (Voir pour détails : G. P. TSCHEBOTARIOFF, 1951 page 77). L'appareil utilisé permet de mesurer la perméabilité de l'échantillon sous diverses pressions (de 0,37 kg/cm² à 4,57 kg/cm²).

Résultats.

En II/14 (mauvais vide à molinie) le sol de surface possède de forts volume des pores, soit 54 p. 100. De même en VIII 25 (belle futaie chêne et hêtre) et aux Baraques Jupilles (belle futaie chêne). De même pour les sols de fourmilière et de prairie.

Quand la pression augmente, la perméabilité, de même que le volume des pores, diminue fortement (fig. 8). Ces diminutions sont encore plus

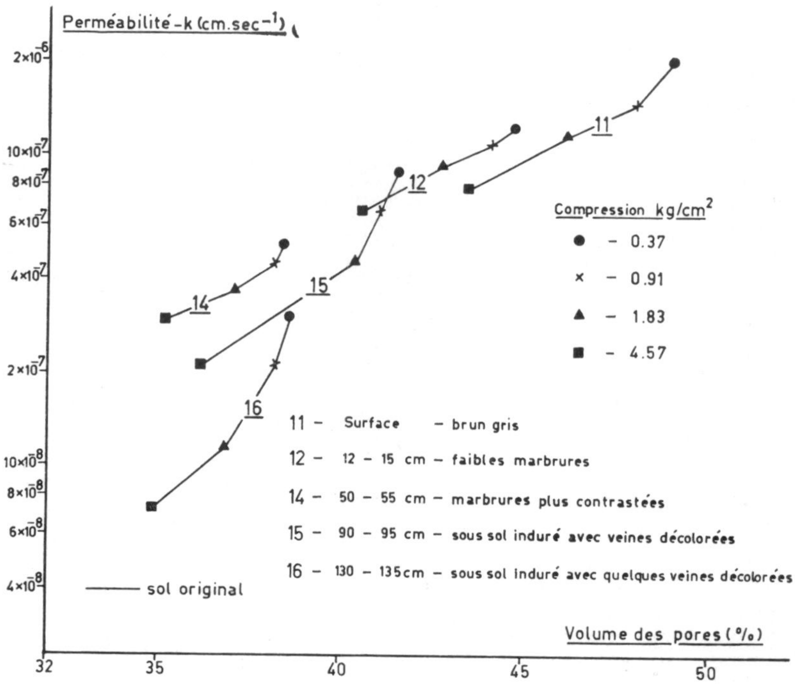


FIG. 10. — Perméabilité (cm. sec⁻¹) et volume des pores (%) de la parcelle I/14 sol de plateau sur sous-sol marmorisé en profondeur de médiocre qualité mais due aux incendies plutôt qu'au sol.

nettes pour les échantillons compacts des sous-sols : en VIII/25 (fig. 9) k devient 40 fois moindre quand la pression devient 13 fois plus grande. De même pour I/14 (chênaie moyenne) (fig. 10). Pour une même augmentation de la pression, le changement de volume des pores est beaucoup moindre pour les échantillons de profondeur que pour ceux de surface : Vraisemblablement en profondeur il n'y a plus guère de pores très

grands (par exemple ceux provenant soit des canaux radiculaires, soit de la formation d'agrégats par floculation de particules d'humus du sol, etc.). Or, ces macropores sont ceux qui se laissent aisément détruire par la pression.

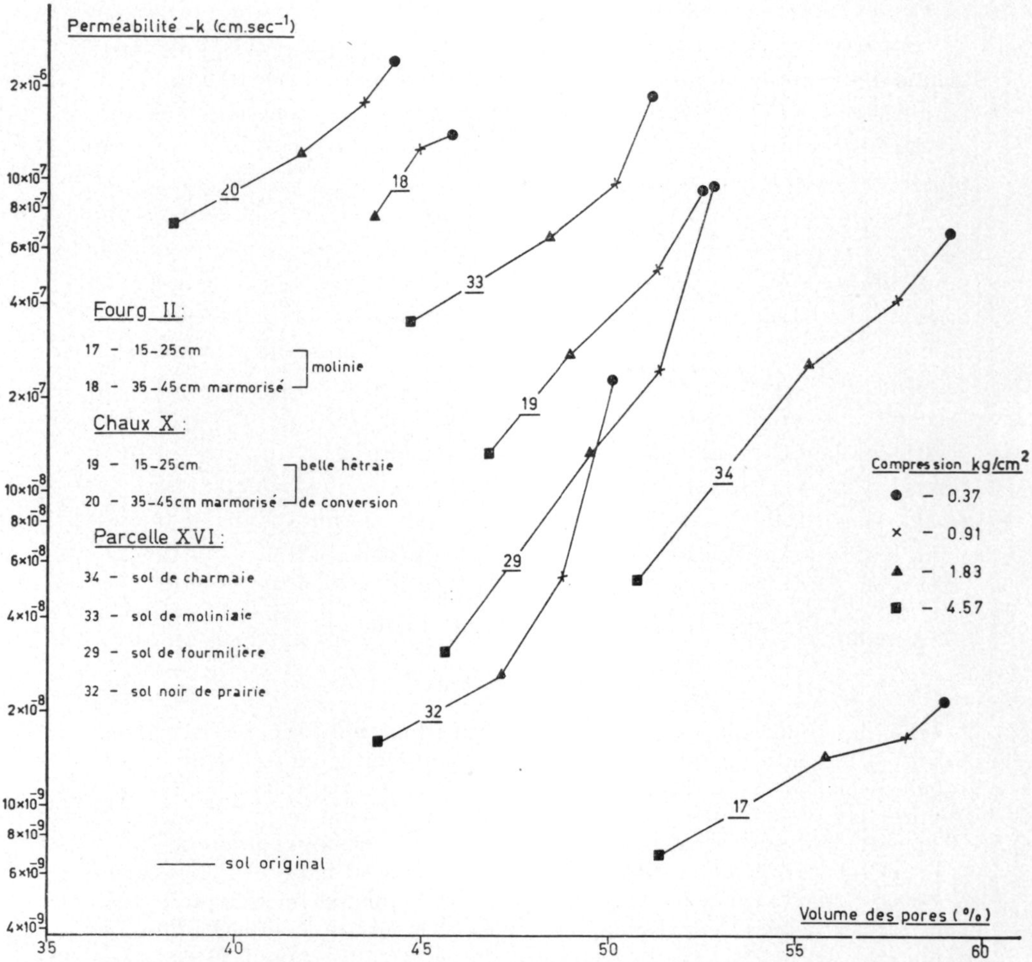


FIG. 11. — Perméabilité (cm. sec⁻¹) et volume des pores (%) de deux parcelles, de part et d'autre d'un chemin Fourg-II (avec molinie) et Chaux-X (avec belle hêtraie de conversion), d'un sol à molinie et d'un sol de charmaie de la même parcelle, d'un sol noir de prairie (sur sous-sol marmorisé en profondeur) et d'un sol de fourmilière.

Les sols de moliniaie ont malgré leur porosité une perméabilité faible : on reviendra dans la 3e partie sur cette importante constatation.

Il n'y a pas de différence dans la valeur de k des sols prélevés juste au-dessus et juste au-dessous de la limite des marbrures.

Les valeurs de k des sols de surface des parcelles II/14 (no 7), Fourg II

(n° 17) et du sol noir de prairie (n° 32) sont à peu près aussi faibles que ceux des sous-sols très fins des parcelles II/14 (n° 10) et VIII/25 (n° 28). Cependant le volume des pores libres des premiers sols est de 15 à 23 p. 100, tandis qu'il est pour les seconds de 5,5 p. 100 à 10,5 p. 100. La raison en est que la porosité des sols ne dépend pas seulement de leur teneur en particules minérales et organiques, mais aussi du mode d'amoncellement de ces particules. En effet, un volume de pores égal peut être atteint aussi bien par un grand nombre de petits pores que par un petit nombre de grands. Il y a une plus faible perméabilité si les pores sont indépendants au lieu d'être associés et ne forment pas des canaux continus où l'eau puisse s'écouler pendant la détermination de k.

Quand les sols sont préalablement séchés, puis pétris avec de l'eau jusqu'à ce que la limite de plasticité soit atteinte, si on détermine la perméabilité, on trouve une valeur plus élevée que pour l'échantillon original. La structure en agrégats est détruite par la sécheresse et le mouillage ; par mouillage il y a un plus grand nombre de pores fins, le total restant le même ; les particules de sol se sont ainsi groupées suivant la compacité maximum dans l'échantillon.

Dans la figure 12 on constate que la valeur de k du sous-sol de la forêt de Chaux n° 49 est aussi basse que celle des argiles *tir noir* (Maroc) et *black regur* (Inde), c'est à-dire d'argiles bien connues dans le monde pour leur grande finesse et leur grande imperméabilité.

II — 4 : Rétention d'eau :

Technique opératoire :

La détermination est effectuée par centrifugation (appareil M. S. E.). Ce type de centrifugeuse est spécialement construit pour la détermination rapide de la valeur de la rétention d'eau (suivant Briggs et McLane 1907). D'après la valeur obtenue pour l'humidité équivalente on peut calculer la « capacité de drainage naturel »» (Veihmeyer et Hendrickson 1931).

Les sols pris dans les cylindres d'acier sont placés dans des boites carrées de 5 × 5 cm et 2 cm de hauteur, fermées par une fine toile métallique au fond. On les laisse pendant deux jours dans un exsiccateur, qui contient au fond un peu d'eau ; le fond des boites repose sur du papier-filtre mouillé. Les vitesses de rotation, appliquées chacune pendant 1 heure, sont successivement : 1 500 tours (pF = 2,56), 2 000 tours (pF = 2,80), 2 400 tours (pF = 2,98) ; 2 600 tours (pF = 3,04), 3 000 tours (pF = 3,16). Pour les sols à forte liaison aqueuse, cette méthode n'est pas satisfaisante. D'autre part, il y a une rupture fâcheuse de la structure lors du transport du sol hors des cylindres vers les boites, mais il s'agissait ici d'arriver à distinguer rapidement de grandes différences entre les sols étudiés. De plus, il a été procédé à quelques déterminations de pF pour des échantillons dans l'intervalle de pF 2,22 à 2,92 selon la méthode de « succion sur plaque poreuse »» et dans l'intervalle de pF 3,06 à 4,10 selon la méthode centrifuge (Croney et al. 1952) dans laquelle l'équilibre définitif est atteint. Dans le premier cas on coupe des cylindres dans l'échantillon original et on les

insère dans des cylindres de matière plastique de 2 cm de diamètre et de 1 cm de hauteur. Dans le second cas, le diamètre des cylindres de matière plastique est de 3,8 cm et la hauteur 1 cm. Ceux-ci restent d'abord pendant deux jours en exsiccateur à fond recouvert d'un peu d'eau.

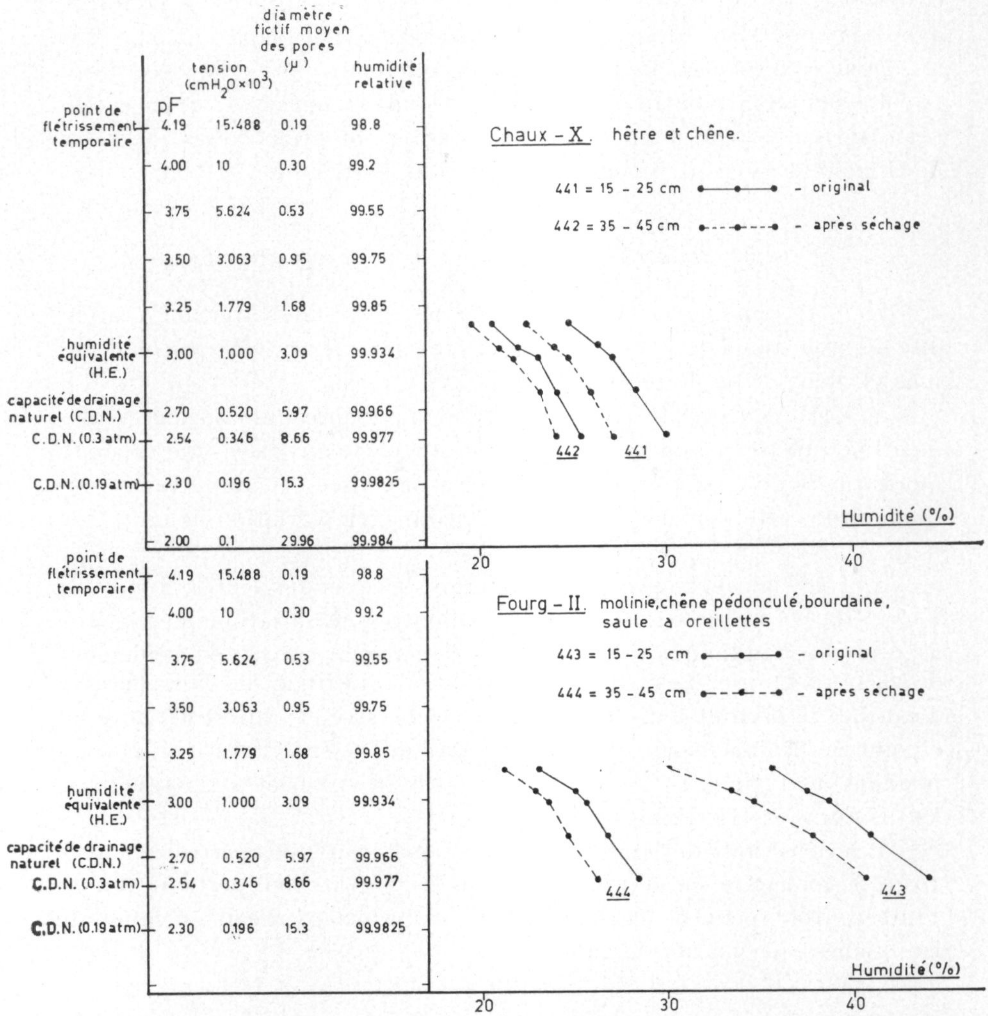


FIG. 13. — Mesure de pF par « soil moisture équivalent centrifugation » (fabrication M.S.E.) pour deux parcelles Chaux-X hêtre et Fourg-II molinie, l'une en face de l'autre, seulement séparés par un chemin.

Résultats.

1° La figure 13 nous montre que si l'on fait varier le pF de 2,56 à 3,16, le sol de la surface de la moliniaie (Fourg II) montre des variations de taux d'humidité de 43 p. 100 à 36 p. 100, tandis que celui de la hêtraie (Chaux X-75) varie de 30 p. 100 à 27 p. 100. Ceci est dû à la teneur plus

grande en matière organique du 1er (Fourg II : humus 4,98 p. 100, perte au feu 7,23 p. 100), (Chaux X 751 : humus 3,02 p. 100, perte au feu 4,80 p. 100) et aussi à sa porosité plus grande. En effet, la teneur en particules minérales de 2 à 10 microns (1) est la même pour les deux sols ; elle correspond à l'intervalle des pF considéré ici et qui sont en équilibre avec les humidités relatives de l'air, respectivement de 99,98 à 99,92 p. 100 (2). Donc ce n'est pas elle la cause de la différence.

La figure 14 montre que le sol de charmaie (humus = 4,92 p. 100, perte au feu = 6,59 p. 100) a une plus faible rétention d'eau que le sol de la moliniaie voisine (humus = 6,54 p. 100, perte au feu = 8,49 p. 100).

2° *Étude de la rétention dans un même profil* (fig. 14).

1. II/14 « mauvais » vide à molinie. On trouve une variation d'humidité de 37 p. 100 à 31 p. 100 pour la couche supérieure (6,81 p. 100 d'humus et 8,29 p. 100 de perte au feu).

2. VIII/25 (belle futaie) : la couche supérieure qui contient seulement 3,06 p. 100 d'humus et 5,38 p. 100 de perte au feu, a une capacité qui varie de 29 à 24 p. 100 ; la couche marmorisée et compacte en profondeur de cette parcelle montre au contraire une variation de 60 p. 100 à 46 p. 100.

3. I/28 : la couche supérieure humifère de ce sol des pentes (humus = 4,38 p. 100, perte au feu = 7,01 p. 100) montre une variation de 37 p. 100 à 30 p. 100, tandis que celle du sous-sol (non marmorisé) est seulement de 24 à 19 p. 100. Les arbres ont moins à souffrir ici de l'insuffisance d'eau qui se produit dans la période de sécheresse et qui est atteinte au « point de flétrissement permanent » (Briggs et Shantz, 1912), correspondant à un pF 4,19 (Schofield 1935, Schofield et Dacosta 1935, Veihmeyer et Hendrickson 1949).

Les déjections de lombrics (humus = 8,33 p. 100, perte au feu = 10,46 p. 100) et le sol de prairie (humus = 3,86 p. 100, perte au feu = 12,01 p. 100) peuvent également retenir beaucoup d'eau, à cause de leur richesse en matière organique.

(1) La hauteur d'ascension capillaire H (en cm) est reliée au diamètre (2 r) des tubes capillaires par la relation $\frac{\pi r^2 H}{4} = \sigma \times 2 \pi r$ (σ = la tension de surface de l'eau = 73 dynes cm^{-1} = 0,0749 g cm^{-1}, à 18°). Si maintenant on admet le même diamètre pour les particules de sol et entassement hexagonal des particules (sol le plus compact) le diamètre des interstices les plus grands cernés par ces particules du diamètre D est alors 0,288 x D.

On obtient donc $H = \frac{0,2996}{0,288} \frac{1}{D} \neq \frac{1}{D}$

(2) L'humidité relative est reliée avec le rayon r des pores qui sont encore remplis d'eau par la relation (comparaison de Kelvin, voir aussi Kohnke 1948) : $\log_e h = \frac{2\sigma}{r} \frac{M}{RT\rho}$

σ = tension d'eau = 73 dynes/cm ; M = le poids moléculaire de l'eau = 18 ;
R = constante du gaz = 8.314 × 10^7 erg/OK ; T = température absolue en °K ; ρ = densité de l'eau = 1 g/cm^3.

La figure 14 donne les pF des échantillons séchés préalablement pendant 1 heure à 110 degrés C et qui ont été ensuite humectés jusque près de leur limite de liquidité (pF d'environ 1 à 1,5). Les courbes montrent que, du fait du sèchage et de la rupture de la structure naturelle, le pouvoir d'absorption d'eau a fortement diminué (V. RICHARDS et FIREMAN 1943, CRONEY et COLEMAN 1954).

TABLEAU II

Volume des pores (%) et volume des pores corrigé pour retention d'eau à l'humidité équivalent de pF_3 *(volume %). Aussi poids spécifique des particules de sol et de densité apparente (%).*

No.	Description (profondeur en cm)	Surface M^2/g	Densité apparente du sol	Poids specifique des particules de sol %
7	II/14: mauvais vide surface	33	1.68	2.52
8	moliniaie au dessus du marbré	20	1.86	2.60
9	sur sol à dans le marbré	23	1.90	2.66
10	similigley 60 cm	53	1.89	2.68
19	Chaux 751 X: 15-25	28	1.65	2.57
20	(hêtraie) 35-45	28	1.87	2.64
17	Fourg. 2: 15-25	38	1.49	2.54
18	(Moliniaie) 35-45	33	1.82	2.63
33	Parcelles sol de charmaie surface	26	1.64	2.54
34	1338/1337 sol de moliniaie surface	33	1.53	2.52
11	I/14: sol de plateau brun gris surf.	23	1.76	2.62
12	faible marbrures 12-15	14	1.81	2.66
13	avec marbrures et structure fondue 30-35	16	1.86	2.66
14	marbrures plus contrastées 50-55	32	2.02	2.68
15	induré avec veines 90-95	49	1.99	2.70
16	induré avec quelques rares veines 130-135	50	1.99	2.69
25	VIII/25: beau peuplement surf.	26	1.52	2.60
26	sol 20	23	1.72	2.64
27	marbré 35	20	1.83	2.62
28	en profondeur 140	109	1.88	2.68
4	Baraques Jupilles surf.	26	1.80	2.64
5	belle futaie au dessus du marbré	23	1.95	2.68
6	artificielle de chêne en dessous du marbré	23	1.98	2.68
29	sol de fourmilière surf.	40	1.54	2.55
31	sol de monticule de chablis surf.	26	1.67	2.58
32	sol noir de prairie surf.	49	1.72	2.58
35	sous le couvert d'un hêtre surf.	33	1.64	2.58
36	à côté en dehors du couvert surf.	30	1.76	2.58

TABLEAU II *(suite)*

No.	Volume des particules de sol	Poids des particules de sol calculé en volume %	Retention d'eau à l'humidité equivalent pF 3 %	Retention d'eau à pF 3 calculé en volume %	Volume des pores du sol original %	Volume des pores-volume d'eau retenu à pF 3 %	Humus %
7	44.9	113.1	33.8	38.2	55.1	16.9	6.81
8	54.7	142.2	24.4	34.7	45.3	10.6	2.24
9	54.8	145.8	22.6	32.9	45.2	12.3	1.03
10	53.0	142.0	37.0	52.5	47.0	− 5.5	0.88
19	46.8	120.3	27.1	32.6	53.2	20.6	3.02
20	54.6	144.1	23.1	33.3	45.4	12.1	1.07
17	38.6	98.0	38.7	37.9	61.4	23.5	4.98
18	52.6	138.3	25.6	35.4	47.4	12.0	1.61
33	45.8	116.3	31.6	36.8	54.2	17.4	4.92
34	38.3	96.5	37.6	36.3	61.7	25.4	6.54
11	51.4	134.7	24.0	32.3	48.6	16.3	2.79
12	53.8	143.1	22.0	31.5	46.2	14.7	1.39
13	55.1	146.6	22.9	33.6	44.9	11.3	0.83
14	59.4	159.2	25.2	40.1	40.6	0.5	0.54
15	58.4	157.7	26.1	41.2	41.6	0.4	0.60
16	59.6	160.3	25.5	40.9	40.4	− 0.5	0.58
25	44.4	115.4	26.8	30.9	55.6	24.7	3.06
26	46.7	123.3	26.4	32.6	53.3	20.7	1.61
27	51.3	134.4	23.9	32.1	48.7	16.6	1.22
28	50.9	136.4	43.7	59.6	49.1	−10.5	0.49
4	51.3	135.4	25.6	34.7	48.7	14.0	2.48
5	58.2	156.0	22.9	35.7	41.8	6.1	0.75
6	62.2	166.7	23.5	39.2	37.8	− 1.4	0.72
29	46.0	117.3	29.3	34.4	54.0	19.6	4.88
31	48.7	125.7	25.1	31.6	51.3	19.7	3.25
32	48.3	124.6	29.1	36.3	51.7	15.4	3.86
35	44.9	115.8	31.1	36.0	55.1	19.1	4.76
36	48.2	124.4	29.4	36.6	51.8	15.2	3.59

La même figure donne des valeurs de pF pour divers types de sols de l'étranger. On y voit que le pF du sous-sol lourd et compact qu'on trouve en profondeur sous le plateau de la forêt de Chaux a une valeur comparable à celui des argiles les plus fines : *tir gris* (Maroc), *terra fusca, margalite* (Java) etc.

Les sols très riches en matière organique, comme les tchernoziems et les argiles tourbeuses, ont aussi un grand pouvoir de rétention d'eau.

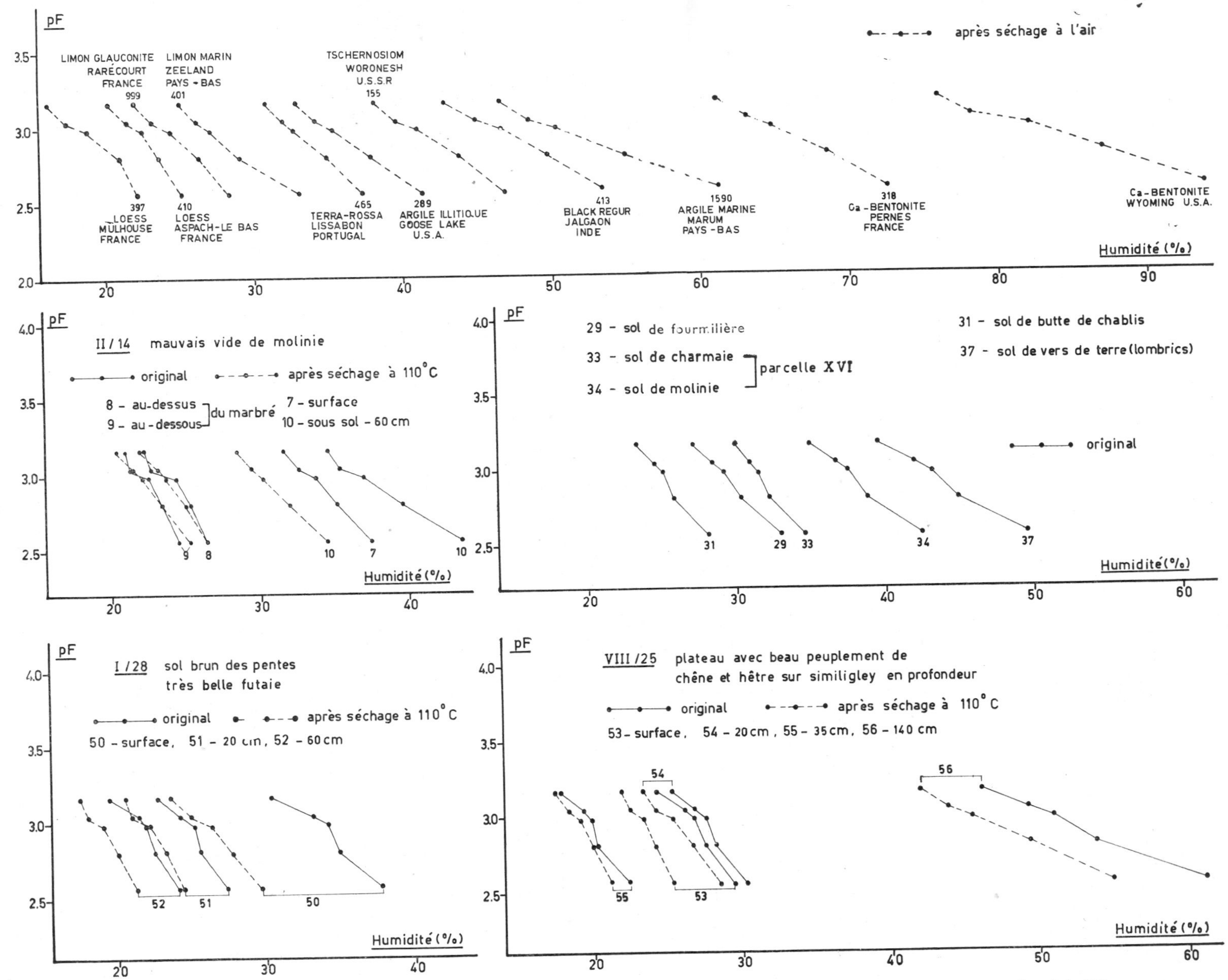
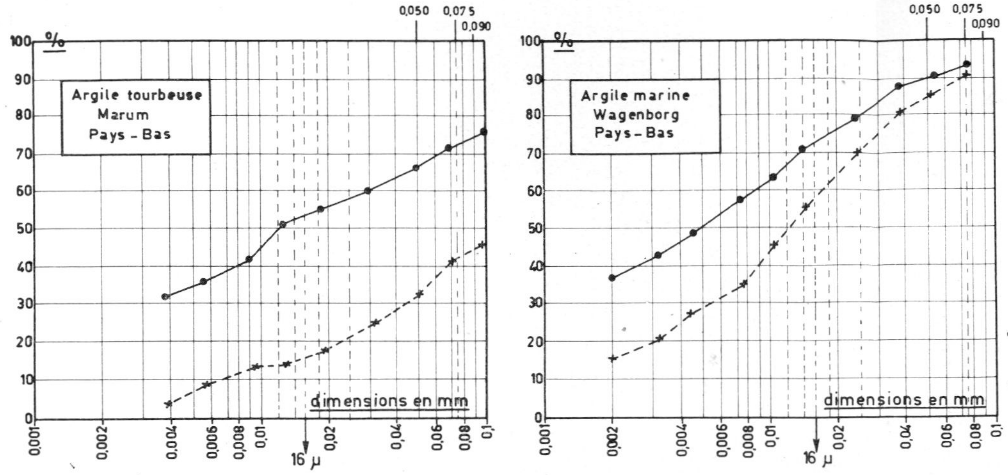
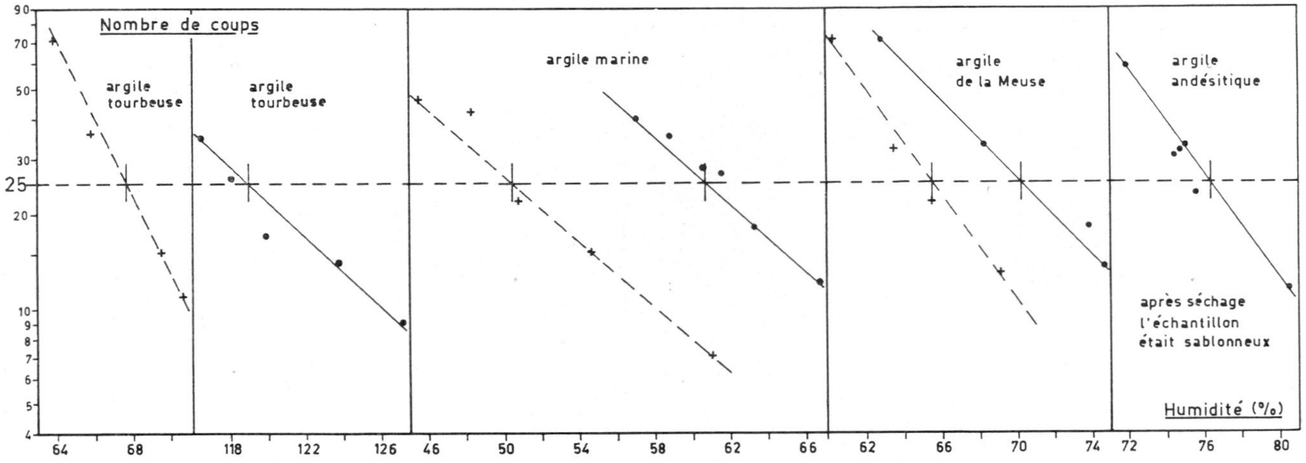
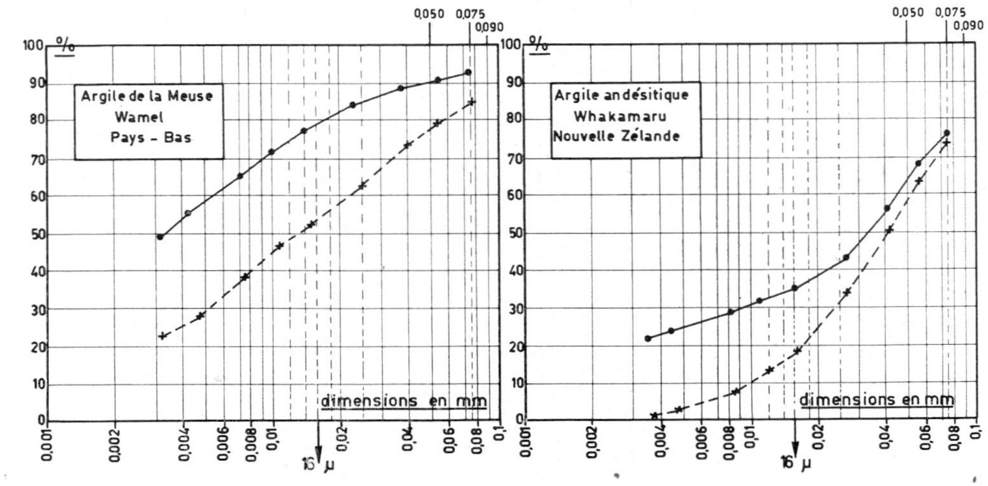


FIG. 14. — Mesure de pF par « soil centrifugation » (fabrication M.S.E.) de divers sols de la Forêt de Chaux et d'autres types de sol de l'étranger.



	Argile tourbeuse		Argile marine	
	orig.	sèch.	orig.	sèch.
Lim. liq. %	119,0	69,5	60,8	50,2
Lim. plast. %	77,5	55,5	31,4	31,0
Ind. plast. %	41,5	14,0	29,4	19,2
< 16 µ %	53,5	15,0	72,5	57,0
Surf. spec. M²/g	185		155	





	Argile de la Meuse		Argile andésitique	
	orig.	sèch.	orig.	sèch.
Lim. liq. %	70,2	65,6	76,3	—
Lim. plast. %	37,7	40,4	52,9	—
Ind. plast. %	32,5	25,2	23,4	—
< 16 µ %	79,0	53,5	34,5	17,4
Surf. spec. M²/g	195		158	

FIG. 3. — Dimensions de particules et constantes d'Atterberg de divers sols de l'étranger analysés en leur condition originale et aussi après séchage, 1 heure à 110° C.

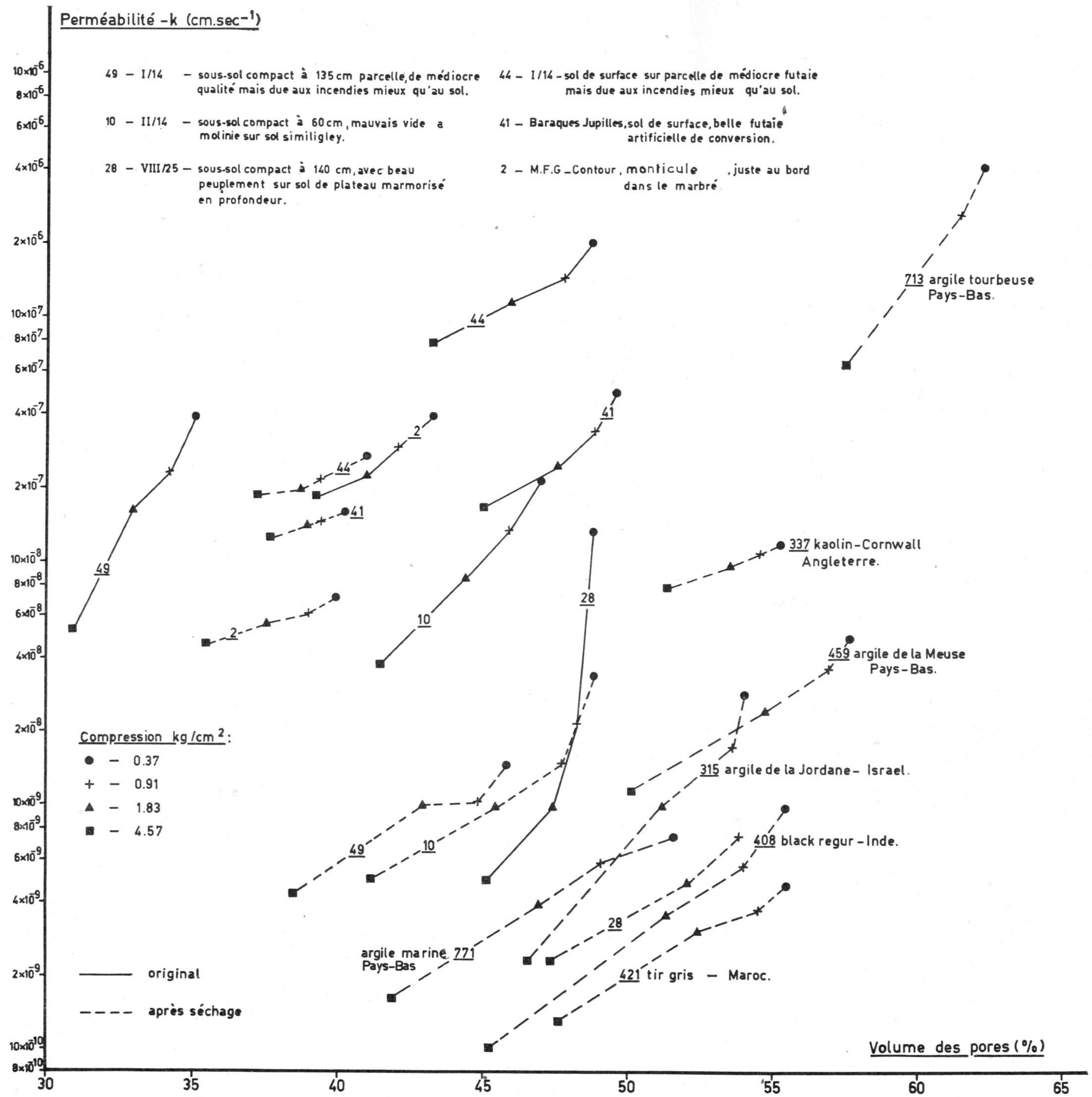


Fig. 12. — Perméabilité (cm. sec⁻¹) et volume des pores (%) de quelques sols de surface et de quelques sous-sols compacts en condition originale et après séchage pendant une heure à 105° C.

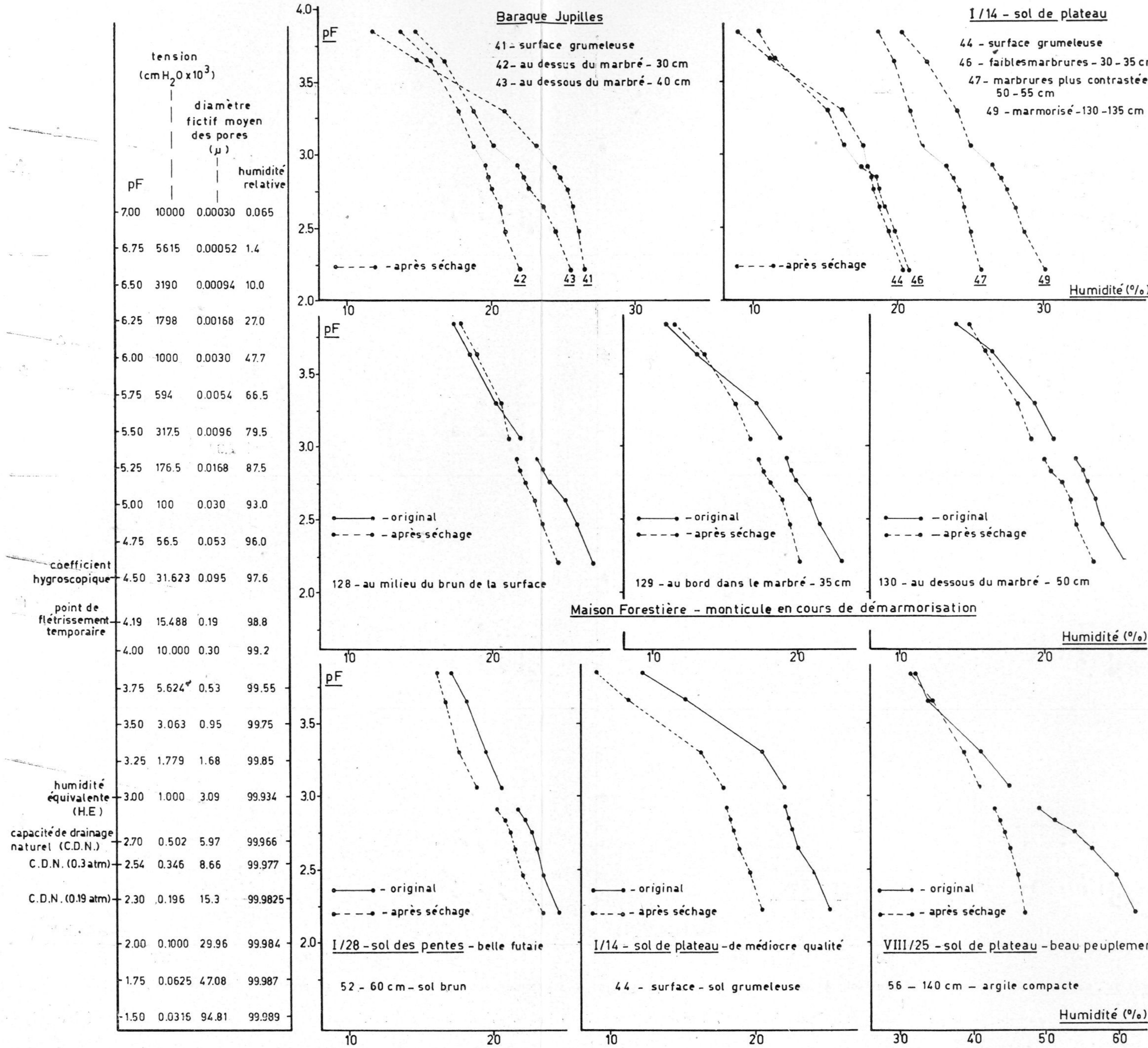


FIG. 16. — Mesures de pF par la méthode de succion sur plaque (pF 2,21 à 2,92) et la méthode par centrifugation (pF 3,06 à 4,10) pour quelques sols de la Forêt de Chaux.

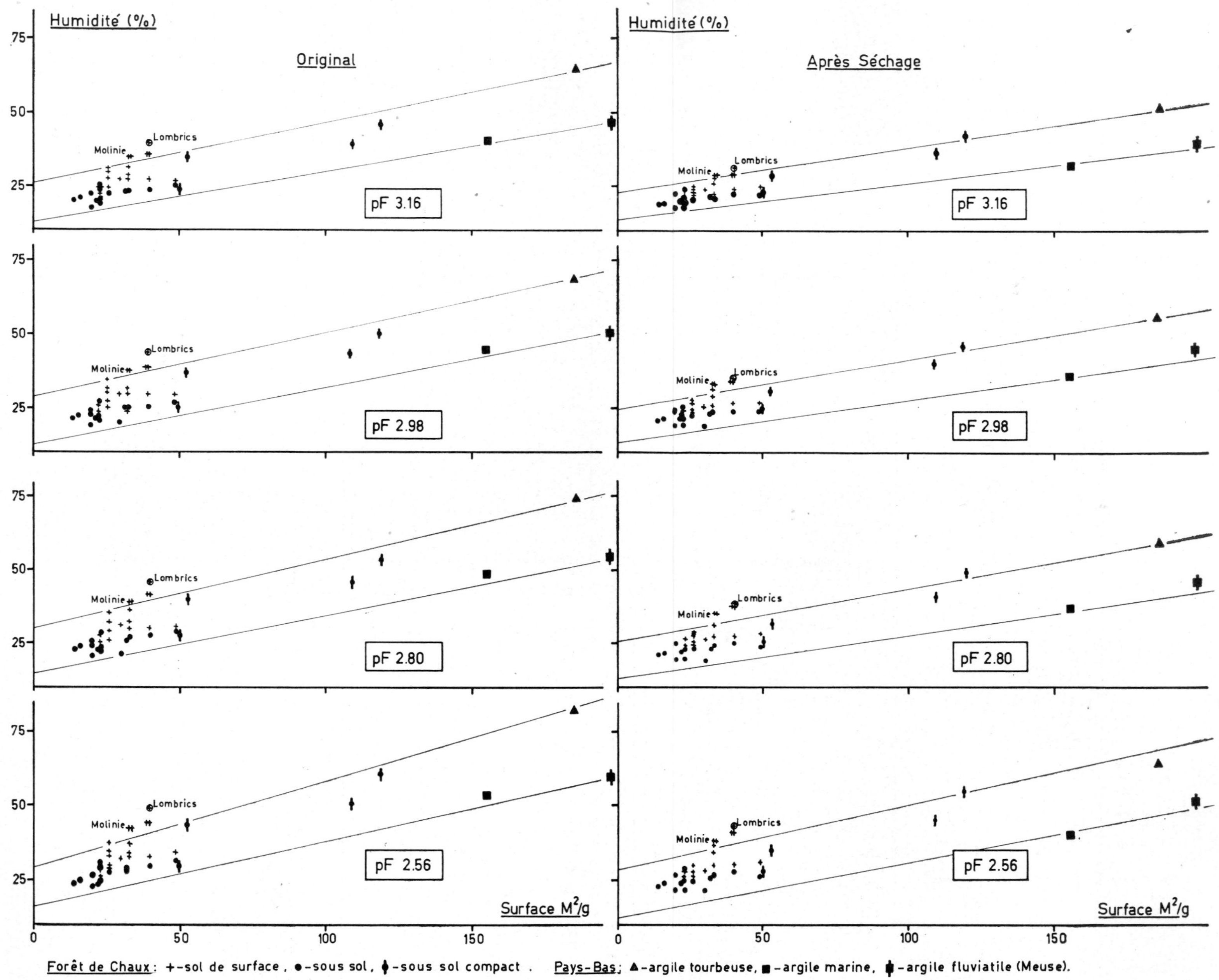


FIG. 15. — Retention d'eau du sol séché auparavant 1 heure à 110° C, à diverses tensions (pF 2,56, pF 2,80, pF 2,98, pF 3,16) et en relation avec sa surface spécifique M²/g

La figure 15 donne les pouvoirs d'absorption d'eau pour diverses valeurs de pF, tant des sols originaux que des sols préalablement séchés, en relation avec la surface (en m^2/g) des sols étudiés. On y constate que pour une surface identique, les couches supérieures humifères peuvent retenir plus d'eau que les couches inférieures pauvres en humus. Le rapport entre la surface et le pouvoir de fixer l'eau se trouve en outre prendre plus de signification à mesure que la tension d'eau produite par la centrifugation est plus grande.

Pour les échantillons séchés il existe, pour un pF de 3,16, une corrélation évidente entre la quantité d'eau absorbée et la surface des particules des sols considérés. En outre, il apparaît dans cette figure qu'après sèchage préalable, l'absorption d'eau a fortement diminué. Ce phénomène de *l'irréversibilité dans l'absorption d'eau* était déjà bien connu. Il se constate aisément avec les terres compactes et surtout avec des terres riches en matières organiques. On en voit la cause :

a) dans la cimentation irréversible par le sèchage de colloïdes du sol (PURI et KEEN, 1925 ; AKHROMEIKO, 1930 ; TYULIN, 1940 ; KROTH et PAGE 1947 ; BIRRELL, 1952).

b) dans la présence de capillaires en impasse, constituant des coussins d'air ;

c) dans la présence de capillaires dont le diamètre n'est pas le même sur toute leur longueur (HAINES, 1930). On sait que de très grandes forces de VAN DER WAALS naissent entre les particules, lorsque celles-ci, du fait de contractions capillaires au cours de l'assèche-ment, se rapprochent les unes des autres.

L'irréversibilité constatée particulièrement par le sèchage d'argiles tourbeuses serait, selon HUDIG et SIEWERTSZ VAN REESEMA, 1940, HUDIG, 1941, et REDLICH et HUDIG 1941, causée par la polymérisation de molécules organiques en humates hydrophobes d'Al, de Si et Al.

Les courbes de la figure 16 dénotent pour le sol grumeleux de surface des deux parcelles Baraques Jupilles et 1/14 une forte diminution de la rétention d'eau pour un pF d'environ 3,25 correspondant à un diamètre de capillaire d'environ 1,5 microns. La couche éluviale du monticule de la Maison forestière qui, après 100 ans était aussi pauvre en humus que la couche située au-dessous d'elle, ne montrait pourtant pas ce phénomène. On constate toutefois dans la courbe de pF de ce profil que l'adsorption d'eau diminue quand la profondeur augmente. Dans cette couche supérieure, l'ancienne argile compacte marmorisée, est par conséquent devenue en 100 ans un peu plus légère par lessivage. De « bigarré », elle est devenue « brunie ». Les figures nous permettent également de constater tant pour le profil Baraques Jupilles que pour celui du monticule, que dans l'intervalle 2,21 à 2,92, l'adsorption d'eau du sol situé juste au-dessus du marbré est moindre que celle du sol situé

juste au-dessous dans le marbré. Dans l'intervalle 3,06 à 4,10 la différence est toutefois minime. Seulement le nombre de grands pores diffère ici pour les deux couches de sol.

Dans la figure 17 sont groupées les valeurs de pF pour quelques échantillons de l'étranger séchés préalablement à l'air, et humectés ensuite selon le procédé indiqué à la Technique opératoire. On y trouve aussi les valeurs de l'échantillon 56 (sous-sol très compact de la forêt de Chaux) séché au préalable pendant 1 heure à 105°C. En une serre chauffée où les premiers échantillons mentionnés ci-dessus furent d'abord séchés (ce qui est la façon courante d'opérer dans les laboratoires) on atteint cependant assez vite une humidité relative d'environ 20 p. 100, ce qui correspond à une valeur du pF d'environ 6,20 ; ou une teneur très proche correspondant à un pF voisin de 7,0, c'est-à-dire, une teneur en humidité relative de 0,065 p. 100 obtenue après dessication de l'échantillon à 100°C. Nous avons fait des mesures de l'adsorption d'eau à des humidités relatives variables qui furent obtenues avec une balance d'adsorption munie de verres de quartz et d'un cathétomètre : elles ont montré qu'il y a dans l'intervalle de pF 6,2 à 8,0 peu de différence dans la rétention d'eau entre les échantillons séchés d'abord à 105°C et ceux qui ont été séchés à l'air, (ou en local chauffé, en serre chaude, ou étuve à environ 70°C).

La figure 17 qui contient aussi les analyses de quelques types de sols bien connus à l'étranger montre que la couche superficielle à texture relativement légère de la forêt de Chaux, avec sa surface de 20 à 40 m²/g, ne peut retenir que peu d'eau liée. Le sous-sol marmorisé de 1/14, qui est un peu plus lourd (surface environ 60 m²/g) adsorbe un peu plus. Toutefois, l'argile lourde compacte du sous-sol (surface environ 100 m²/g), possède un fort pouvoir d'adsorption. Pour la montmorillonite-Ca, on trouve des valeurs encore plus hautes. Ensuite, vient la bentonite-Na, possédant un pouvoir d'adsorption d'eau tout particulièrement élevé qui est du à sa surface spécifique d'environ 700 à 800 m²/g, avec en outre, 100 milliéquivalents pour 100 g de bases échangeables lesquelles, on le sait, sont fortement hydrophiles.

III — 1 : Acidité actuelle (pH) ; potentiel d'oxydo-réduction (Eh en mV) et coefficient redox (rH).

Technique opératoire :

Le pH est mesuré en suspension aqueuse (sol/eau = 1/2,5) et avec l'électrode de verre et de calomel ; le pH est également déterminé sur le sol préalablement séché pendant 2 heures à 110°C et sur un sol préalablement noyé pendant 2 mois.

Le Eh (en mV) est mesuré à l'aide de l'électrode de platine et calomel dans

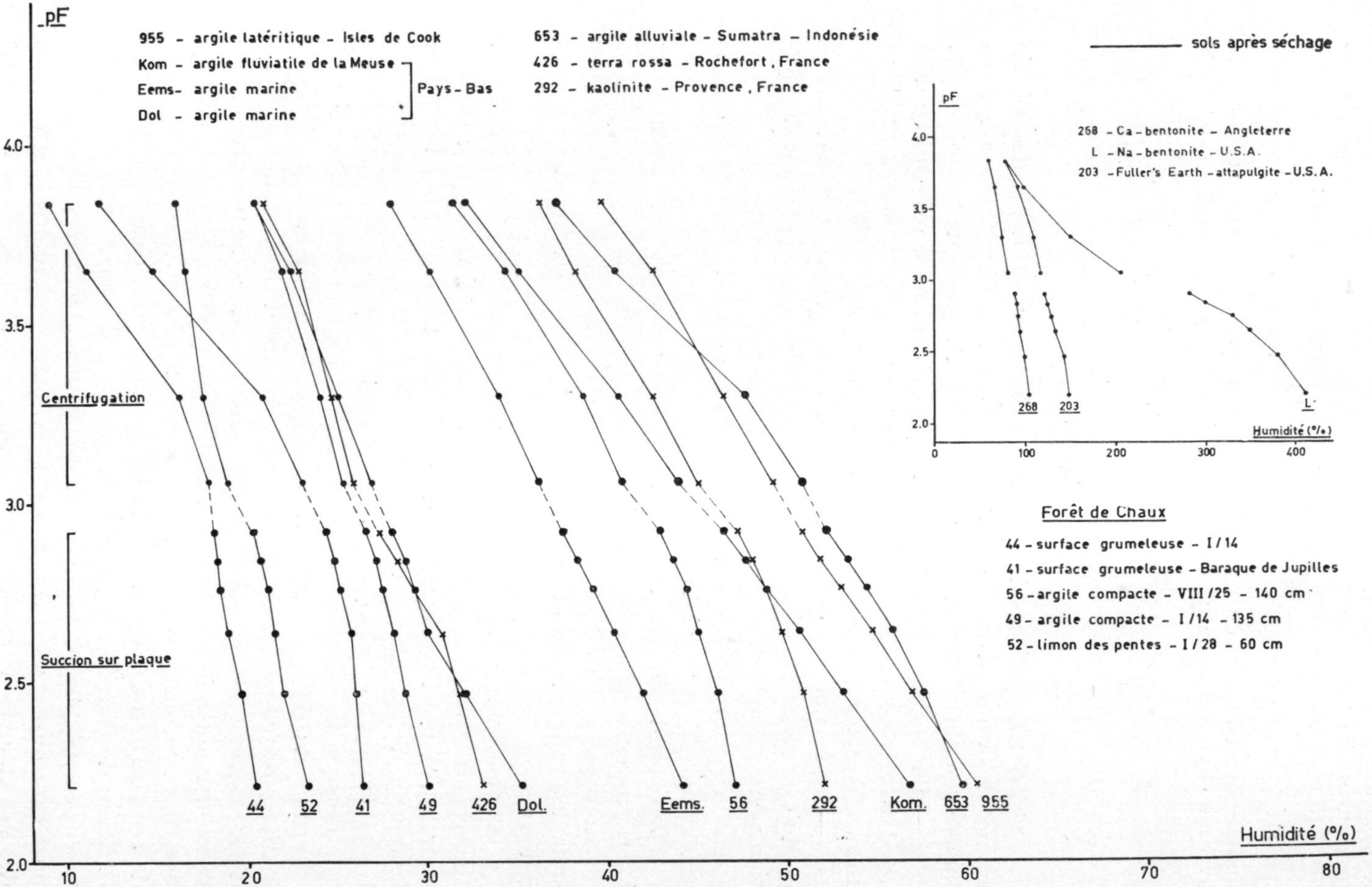


FIG. 17. — Mesures de pF par la méthode de succion sur plaque (pF 2,21 à 2,92) et la méthode par centrifugation (pF 3,06 à 4,10) pour quelques sols de la Forêt de Chaux et de l'étranger.

les suspensions mêmes où furent mesurés les pH. Le coefficient redox de la suspension du sol (rH = logarithme négatif de la pression de H^2 libre dans la suspension) est exprimé en atmosphères et calculé par la relation :

$rH = 2pH + \frac{Eh + 249{,}5 + 0{,}45\,(t - 20)}{29{,}09 + 0.099\,(t - 20)}$. Il est également possible de mesurer le rH d'un échantillon directement d'après le potentiel E en mV trouvé avec une électrode de platine et une électrode de verre, il y a en effet la relation :

$$rH = \frac{E + 408{,}5 + 1{,}10\,(t - 20)}{29{,}09 + 0{,}99\,(t - 20)}.$$

Résultats.

1° *pH* : Les chiffres du tableau III montrent que le pH des sols de surface de la forêt dans leur état original est de 4,6 à 5,5, le sol de fourmilière 5,76, le sol noir de prairie : 8,03, les déjections de lombrics : 7,0.

— Par sèchage les sols sont devenus plus acides, phénomène déjà constaté (BAILEY 1932, BURROWS et CORDON 1936, HUBERTY et HAAS 1940, DAVIS 1943, ROMANOFF 1945, BOWSER et LEAT 1958).

— Après une submersion de 2 à 3 mois, une augmentation de pH se produit en général pour les sols riches en matière organique, une diminution pour les autres.

2° *Eh* et *rH* : L'Eh des sous-sols originaux de la forêt varie de 180 à 220 mV et le rH de 24,2 à 26,4.

Les sols de surface donnent des chiffres moins élevés, surtout pour le rH, qui est le plus significatif.

Lorsque le sol est séché, l'Eh et le rH augmentent nettement par suite de l'entrée de l'air dans le sol qui provoque l'oxydation des matières réduites.

Par le séchage on arrive, pour tous les horizons, à un rH voisin de 26. Exceptions seulement pour les 2 sols les plus organiques (29). Comme pour le pH les déterminations de Eh et rH d'un sol dépendent donc largement du traitement de l'échantillon entre le prélèvement et l'analyse (BURROWS et CORDON 1936, QUISPEL 1947, FLAIG et al. 1955).

Lorsque les sols sont noyés pendant 2 à 3 mois une baisse de l'Eh et surtout du rH se produit fortement pour les sols de surface riches en matières organiques. La cause en est l'absence d'air dans un sol gorgé d'eau stagnante, ce qui provoque les processus de réduction par la matière organique. Ce phénomène a déjà été signalé par BURROWS et CORDON 1936. Selon les observations récentes de LAFOND (1950) et surtout de LOSSAINT (1959), il y a une différence du pouvoir réducteur : celui de la litière de charme est plus élevé que celui du pin ; ceci est dû à la teneur en polyphénols plus élevé de la première. On a ainsi une méthode pour caractériser les divers types de la matière organique. Les analyses des sols ennoyés de la forêt nous montrent que le pouvoir réducteur de

TABLEAU III

pH, Eh *et* rH *des sols de la forêt de Chaux en conditions originales, après sèchage (1 heure à 105° C) et aprés ennoyage (de 2 mois).*

No.	Description (profondeur en cm)			Perte au feu %	Humus %
7	II/14: mauvais	surf.		8.29	6.81
8	vide à	juste au dessus	de la limite	3.63	2.24
9	molinie	juste en dessous	du marbré	2.92	1.03
10		marbré - 60		5.16	0.88
11	I/14:		surf.	3.87	2.79
12	limon de		12-15	2.85	1.39
13	plateau		30-35	2.40	0.83
14	peuplement		50-55	3.13	0.54
15	dégradé par		90-95	3.88	0.60
16	l'incendie		130-135	4.02	0.58
25	VIII/25: limon de plateau		surf.	5.38	3.06
26	beau peuplement		20	3.61	1.61
27	sur sol à		35	3.34	1.22
28	similigley		140	7.66	0.49
21	I/28: sol brun		surf.	7.01	4.38
22	des pentes		20	4.44	2.46
23	(très belle futaie)		60	3.01	0.68
19	Chaux X-751	de part	15-35	4.80	3.02
20	(chêne et hêtre)	et d'autre	35-45	3.30	1.07
17	Fourg. (mauvais	d'un	15-35	7.23	4.98
18	vide à molinie)	chemin	35-45	3.79	1.61
1	Monticule	au milieu du sol brun		3.59	0.54
2	Forest	juste au bord dans le marbré		2.80	0.98
3	Grand cont.	dans le marbré en dessous		2.99	0.78
4	Baraque Jupilles	surf.		4.00	2.48
5	belle futaie	au dessus du marbré		2.71	0.75
6	artificielle	en dessous dans le marbré		2.70	0.72
29	sol de fourmilière		surf.	6.50	4.88
32	sol noir de prairie		surf.	12.01	3.86
37	dejections de lombrics		surf.	10.46	8.33

TABLEAU III *(suite)*

No.	pH			Eh(m.volt)			rH		
	Après séchage	Original	Ennoyé	Après séchage	Original	Ennoyé	Après séchage	Original	Ennoyé
7	4.65	5.35	5.95	238	118	− 20	26.0	23.3	19.8
8	4.85	5.05	4.80	226	195	155	26.0	25.4	23.6
9	4.86	5.05	4.56	228	210	195	26.1	25.9	24.6
10	4.80	4.96	4.37	228	218	210	26.0	26.0	24.5
11	5.00	5.33	5.65	208	145	40	25.7	24.2	22.3
12	4.95	5.56	4.10	209	180	185	25.6	25.8	23.1
13	4.85	5.05	4.53	215	190	185	25.6	25.2	24.0
14	4.67	5.03	4.50	216	196	190	25.3	25.4	24.1
15	4.66	5.12	4.55	218	200	185	25.4	25.7	24.0
16	4.77	4.87	4.65	220	220	187	25.7	25.9	24.3
25	4.55	4.68	5.75	220	220	− 40	25.2	25.5	18.7
26	4.49	4.83	4.52	238	210	140	25.7	25.4	22.4
27	4.51	4.85	4.60	239	216	152	25.8	25.7	23.0
28	4.49	5.27	5.11	238	210	190	25.7	25.6	25.3
21	4.96	5.65	6.56	226	190	−120	26.2	26.4	17.6
22	4.94	5.21	5.25	238	206	85	26.6	26.1	22.0
23	4.73	5.33	4.80	232	198	135	26.0	26.0	22.8
19	4.96	5.21	6.28	216	206	− 90	25.9	26.1	19.4
20	4.79	4.82	4.89	218	220	115	25.6	25.8	22.3
17	4.69	4.96	6.13	220	210	− 65	25.5	25.7	18.6
18	4.91	5.20	4.52	218	199	155	25.9	25.8	22.9
1	5.06	5.25	4.45	210	200	200	25.9	25.9	24.3
2	5.00	4.98	4.73	212	205	204	25.9	25.6	25.0
3	4.92	5.10	4.38	228	210	210	26.2	25.9	24.5
4	4.96	5.10	5.85	228	160	− 46	26.3	24.3	17.2
5	4.70	4.96	4.33	231	175	165	25.9	24.4	22.9
6	4.98	5.12	4.40	220	180	190	26.1	25.0	23.9
29	5.89	5.76	6.10	188	172	− 20	26.8	26.0	20.1
32	7.80	8.03	7.25	140	118	−150	29.0	28.7	17.9
37	7.00	6.88	6.95	210	190	−195	29.8	28.9	15.7

la matière organique de la molinie est moins actif par unité de poids de matière organique que celui du chêne : la différence des rH secs et ennoyés est de 7,2 pour 1/28 en surface et de 3,2 en profondeur, de 0,8 pour 1/14 en profondeur, de 14,1 pour les déjections de lombrics.

La différence entre les deux échantillons opposés du même couple : Fourg (moliniaie) et Chaux X-751 (hêtraie) est faible.

En milieu réducteur l'assimilation par les racines des éléments nutritifs du sol est très contrariée. Plusieurs recherches ont été publiées sur l'influence de la concentration d'oxygène dans le sol en relation avec la croissance de la plante (CLEMENTS, 1921 ; CANNON et FREE, 1925 ; ARNON et HOAGLAND, 1940 ; GILBERT et SHIVE, 1942 ; PEPKOWITZ et SHIVE, 1944 ; CHANG et LOOMIS, 1945 ; LAWTON, 1946 ; ERICKSON, 1946 ; TAYLOR, 1949 ; PAGE et BODMAN, 1951 ; RUSSEL, 1952 ; WIERSMA et MORTLAND, 1953 ; LARSON, 1954 ; HAMMOND et al. 1955 ; SHAPIRO et al., 1957 ; DANIELSON et RUSSELL, 1957 ; FLOCKER, 1959).

Selon divers auteurs, une forte dégradation du sol est produite par suite de la forte action réductrice de certaines litières forestières (BLOOMFIELD, 1955, 1957 ; SCHNITZER et DE LONG, 1955 ; SCHNITZER, 1959 ; LOSSAINT, 1959) par temps humide, en hiver. Le fer et le manganèse (ainsi que Al, Cu, Zn, Co, etc.) peuvent être déplacés sous la forme de sels tanniques (LAATSCH, 1937) ou de chélates métalliques dérivés (COPPER et RUDOLPH, 1953, SCHATZ et al. 1954). On connaît l'emploi de l'acétate de fer-éthylène-diamine-tétra-acétique (E. D. T. A.) (qui reste très soluble, même sous un pH élevé) pour combattre la chlorose ferrique des végétaux (DUFRENOY, 1954 ; WEINSTEIN et al., 1954).

Le lessivage des sesquioxydes de fer et de manganèse vers le sous-sol fournit les éléments des taches rouge-brun, brunes et brun-noir, et ceux des nombreuses concrétions que l'on trouve généralement dans ces sols marmorisés.

III — 2 : Bases échangeables et capacités d'échange de cations.

Technique opératoire :

A — *Bases échangeables* : Un mélange de 25 g de sol et de 100 cc de sable quartzeux est introduit dans un tube de verre de 38 cm de long et de 2,75 cm de diamètre se terminant d'un côté par une pointe de 0,75 de diamètre. Cette pointe est fermée avec une boule de papier filtre, de la laine de verre, et enfin, avec une couche de sable quartzeux d'un cm d'épaisseur. Après avoir rempli le tube avec le mélange du sol et sable quartzeux, on recouvre la couche supérieure du mélange avec 1 cc de sable quartzeux et ensuite avec un tampon de laine de verre. On percole ce mélange sol-quartz-sable avec 250 cc de NH_4Cl en solution demi-normale ; on détermine K, Na, Ca, Mg, et Mn du filtrat.

B — *Capacité d'adsorption.* Un mélange de 10 ou 25 g de sol avec 80 ou 100 cc de sable quartzeux est introduit dans un tube de verre comme précédemment. On percole avec 400 cc d'acétate de Na demi normal et de pH environ 8,2. Le sol en excédent est lavé avec 250 cc d'alcool à 80 p. 100, puis on percole avec 250 cc d'une solution de NH_4Cl demi-normale. Dans le filtrat, on détermine Na à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme. Cette méthode à l'acé-

TABLEAU

Bases échangeables, capacité d'échange de cations (C.E.C.) et surface spécifique, pH, Humus, $CaCO_3$ de divers sols de la Forêt de Chaux

No.	Description (profondeur en cm)				en milliéquivalents pour 100 g de sol		
					K_2O	Na_2O	CaO
715	XII/15 mauvais vide, sol marbré			110	0.13	0.22	0.60
441	Chaux X-751		de part et	15- 25	0.11	0.20	0.24
442	chêne et hêtre		d'autre	35- 45	0.11	0.16	0.20
443	Fourg. - mauvais		d'un	15- 25	0.12	0.20	0.28
444	vide à molinie		chemin	35- 45	0.08	0.16	0.26
53	VIII/25 -	beau	brun	surf.	0.21	0.40	0.56
54		peuplement	ocre	20	0.21	0.32	0.65
55		sur	ocre	35	0.18	0.28	0.74
581		sous-sol	marbré	80	0.17	0.12	0.45
56		marmorisé	marbré	140	0.38	0.34	4.75
11	I/14 -	sol	brun gris	surf.	0.17	0.15	0.50
12		de plateau	faible marbrures	12- 15	0.16	0.12	0.46
13		sur	avec marbrures et structure fondue	30- 35	0.11	0.12	0.35
14		sous -	marbrures plus contrasté	50- 55	0.17	0.12	0.50
15		sol marbré	induré avec veines	90- 95	0.32	0.13	1.36
16			induré avec	130-135	0.28	0.16	1.45
340			quelques veines	150	0.20	0.20	2.44
52	I/28 -	sol brun des pentes avec		60	0.26	0.15	0.55
582		très belle futaie		80	0.15	0.10	0.48
376	Monticule depuis		brun	surf.	0.18	0.05	0.48
1	100 ans M.		brun	20	0.25	0.10	1.34
2	Forestière		dans le marbré juste au bord		0.26	0.30	1.00
3	Grand Cont.		dans le marbré		0.27	0.25	1.01
602	loess (décalcifié), F. de Valence - France			0- 20	0.17	0.25	10.9
604	loess (- d° -), Les Ecrennes - France			0- 20	0.49	0.27	+ 13.9
599	loess (- d° -), Croissy-s-Eure - France			0- 20	0.13	0.40	12.0
412	loess (- d° -), Aspach Le Bas - France			0- 20	0.15	0.28	9.5
2189	loess (- d° -), Hannover - Allemagne			0- 20	0.34	0.39	+ 17.4
1192	loess (- d° -), Limburg - Pays-Bas			0- 20	0.48	0.38	8.8
L-165	Limon, Limburg - Pays-Bas			0- 20	0.23	0.30	4.2
L-193	Limon, Limburg - Pays-Bas			0- 20	0.96	0.22	2.0
521	terra rossa (calcite), Albergaria - Portugal			0- 20	0.52	0.55	+ 35.3
426	terra rossa (calcite), Rochefort - France			0- 20	0.08	0.65	11.02
27	terra rossa (dolomite), Crna Gora - Yougo-Slavie			0- 20	0.17	0.20	16.0
955	argile latéritique, Isles de Cook			0- 20	0.33	0.20	3.0
188	argile latéritique, Kiara Pajoeng - Java			0- 20	0.17	0.22	1.5
166	limon rhyolitique, Siantar - Sumatra			0- 20	0.17	0.15	2.1
771	argile marine, Wagenborgen - Pays-Bas			0- 20	0.26	0.41	+ 26.6
1	argile marine, Steenbergen - Pays-Bas			0- 20	1.02	10.3	13.3
344	argile de la Meuse, Kerkwijk - Pays-Bas			0- 20	0.21	0.45	27.5
400	limon alluvial, basse terrasse Rhin, Alsace - France			0- 20	0.17	0.18	4.0
838	argile du Jordan - Israël			0- 20	2.23	x 27.8	17.6
839	argile du Jordan - Israël			0- 20	1.88	x 29.7	14.8

IV

et aussi d'autres types de sol de l'étranger.

No.	en milliéquivalents pour 100 g de sol				Total / C.E.C.	Cations en % de la capacité d'échange de cations				Surface	pH	Humus	$CaCO_3$ + $CaMg(CO_3)_2$
	MgO	Mn	Total	C.E.C.	x 100	K %	Na %	Ca %	Mg %	M2/g	(sèché)	%	%
715	0.8	tr	1.75	7.7	23	1.7	2.9	7.8	10.4	28	5.4	0.6	0
441	0.8	tr	1.35	5.6	24	2.0	3.6	4.3	14.3	28	5.0	3.0	0
442	0.6	tr	1.07	5.0	21	2.2	3.2	4.0	12.0	28	4.8	1.1	0
443	1.2	tr	1.80	9.9	18	1.2	2.0	2.8	12.1	38	4.7	5.0	0
444	0.6	tr	1.10	6.4	17	1.3	2.5	4.1	9.4	30	4.9	1.6	0
53	0.8	0.1	2.07	7.6	27	2.8	5.3	7.4	10.5	23	4.6	3.1	0
54	0.8	0.1	2.08	7.8	27	2.7	4.1	8.3	10.3	23	4.5	1.6	0
55	0.7	0.1	2.00	6.6	30	2.7	4.2	11.2	10.6	26	4.5	1.2	0
581	0.8	0.1	1.64	7.2	23	2.4	1.7	6.3	11.1	33	5.9	1.1	0
56	2.2	tr	7.67	23.4	33	1.6	1.5	20.3	9.4	119	4.5	0.5	0
11	0.8	tr	1.62	5.9	27	2.9	2.5	8.5	13.6	23	5.0	2.8	0
12	0.8	tr	1.54	5.7	27	2.8	2.1	8.1	14.0	14	4.9	1.4	0
13	0.7	tr	1.28	5.1	25	2.2	2.4	6.9	13.7	16	4.9	0.8	0
14	0.9	tr	1.69	7.9	21	2.2	1.5	6.3	11.4	32	4.7	0.5	0
15	1.2	tr	3.01	12.5	24	2.6	1.0	10.9	9.6	49	4.7	0.6	0
16	1.4	tr	3.29	14.1	23	2.0	1.1	10.3	9.9	50	4.8	0.6	0
340	1.2	tr	4.04	15.4	26	1.3	1.3	15.8	7.8	49	5.0	0.1	0
52	0.8	0.2	1.96	6.7	29	3.9	2.2	8.2	11.9	23	4.7	0.7	0
582	0.9	0.4	2.03	6.9	29	2.2	1.4	7.0	13.0	33	5.3	0.9	0
376	0.9	tr	1.61	7.9	20	2.3	0.6	6.1	11.4	30	5.0	0.4	0
1	1.2	tr	2.89	12.1	24	2.1	0.8	11.1	9.9	40	5.1	0.5	0
2	1.0	tr	2.56	6.3	41	4.1	4.8	15.9	15.9	20	5.0	1.0	0
3	1.1	tr	2.63	7.9	33	3.4	3.2	12.8	13.9	30	4.9	0.8	0
602	1.3	tr	12.62	13.6	93	1.2	1.8	80.1	9.6	46	7.2	0.5	0
604	1.1	tr	+ 15.76	13.1	120	3.7	2.1	+ 106.1	8.4	48	7.2	1.6	0.6
599	1.2	tr	13.73	14.2	97	0.9	2.8	84.5	8.4	49	7.2	0.5	0
412	1.2	0.1	11.23	17.1	66	0.9	1.6	55.6	7.0	73	5.3	2.9	0
2189	1.8	tr	+ 19.93	16.0	125	2.1	2.4	+ 108.8	11.2	79	8.1	2.1	0.8
1192	0.9	0.1	10.66	11.3	94	4.2	3.4	77.9	8.0	53	6.2	2.8	0
L-165	1.0	0.1	5.83	7.5	78	3.1	4.0	56.0	13.3	33	6.0	1.4	0
L-193	1.1	tr	4.28	6.1	70	15.7	3.6	32.8	18.0	26	5.8	1.6	0
521	3.0	tr	+ 39.37	38.9	101	1.3	1.4	+ 90.7	7.7	208	7.8	1.0	1.8
426	1.1	tr	12.85	12.6	102	0.6	5.2	87.4	8.7	65	8.0	0.9	21.7
27	3.6	tr	19.97	23.4	85	0.7	8.6	68.4	15.4	265	7.0	3.4	0
955	5.8	tr	9.33	27.1	34	1.2	0.7	11.1	21.4	191	4.6	4.1	0
188	2.0	1.1	4.99	13.1	38	1.3	1.7	11.4	15.3	115	5.9	1.5	0
166	2.0	1.6	6.02	6.3	96	2.7	2.4	33.3	31.8	56	6.4	1.7	0
771	3.8	tr	+ 31.07	30.8	101	0.8	1.3	+ 86.4	12.3	142	7.6	2.6	0.7
1	10.2	0.1	34.92	39.9	88	2.6	25.8	33.3	25.6	165	5.4	0.5	0
344	4.3	tr	32.46	39.0	83	0.5	1.2	70.5	11.0	185	5.6	6.9	0
400	1.7	tr	6.05	12.9	47	1.3	1.4	31.0	13.2	36	5.4	4.2	0
838	24.6	tr	x 72.23	56.1	129	4.0	x 49.6	31.4	43.9	251	7.9	0.1	0
839	26.6	tr	x 72.98	51.0	143	3.7	x 58.2	29.0	52.2	214	8.4	0.1	0

TABLEAU

No.	Description (profondeur en cm)		en milliéquivalents pour 100 g de sol		
			K_2O	Na_2O	CaO
979	limon glauconite, Rarécourt - France	0- 20	0.32·	0.18	8.1
394	terra fusca, Ougney - France	0- 20	0.49	0.30	27.6
401	terra fusca, Nancy - France	0- 20	0.53	0.67	17.6
L-22	terra fusca, Limburg - Pays-Bas	0- 20	0.68	0.87	+ 40.8
155	tchernoziom, Woronesh - U.S.S.R.	0- 20	0.64	0.40	35.9
193	argile margalite, Wonoredjo - Java	0- 20	1.27	0.24	24.3
644	black regur, Poona - Inde	0- 20	0.68	0.45	+ 56.5
V	argile tourbeuse, Peize - Pays-Bas	0- 20	0.94	0.44	7.9

No. 166: Mn échangeable = 25,4% de sa C.E.C.

tr = < 0.1 milliéquivalents pour 100 g.

\+ = trop fort à cause de la présence de $CaCO_3$ (et $CaMg(CO_3)_2$) très fine.

x = trop fort à cause de la présence de NaCl, $NaHCO_3$, Na_2SO_4.

tate de Na vaut mieux que celle à l'acétate d'NH_4 ou à celle à l'acétate de Ca, qui sont souvent proposées. En effet l'emploi d'ions NH^+_4 pour l'échange donne, pour les sols fixant K, une valeur trop basse pour la totalité des ions échangeables. En effet, ces sols possèdent la propriété de pouvoir fixer fortement l'ion NH^+_4 (le diamètre et la polarisabilité des deux ions étant les mêmes), d'où il résulte une valeur trop basse pour la capacité d'échange de cations(VAN DER MAREL 1954, SAWHNEY et al 1959). L'emploi d'acétate de Ca ou d'autres solutions pouvant donner naissance à des hydroxydes difficilement solubles (Mg, Ba, Ca, Cu, Al) donne une valeur erronée à cause de la formation de cations complexes comme Mg $(OH)^+$, Ba $(OH)^+$ etc. (VAN DER MAREL 1935, BOWER et TRUOG 1941, BOSSETT 1958 et RICH 1960).

Résultats.

1° *C. E. C.* : Le tableau IV montre que les sols de la forêt de Chaux ne contiennent qu'une petite quantité d'ions échangeables, et cela par suite de leur faible teneur en argile. Seuls, les sous-sols lourds font exception (La C. E. C. y est de 23,4 *me* contre 5 à 10 ailleurs). Les limons néerlandais ont aussi à peu près la même C. E. C.. Pour le loess décalcifié de divers pays on trouve de 11 à 14. Pour les terres latéritiques fortement désintégrées, on trouve 7 à 12. Les sols argileux, dont l'argile fine contient en plus beaucoup de minéraux à écarts réticulaires variables (minéraux gonflants), ont une capacité d'échange de cations de 40 à 72 : argile marine (Steenbergen, Pays-Bas), argile de la Meuse (Pays-Bas), argile du Jordan, *terra fusca* (Pays-Bas,) margalite (Java), *black regur* (Inde). Pour l'argile tourbeuse (Pays-Bas) elle est très élevée 57,9 et pour le tchernoziom (U. R. S. S.) de 47,4 : ceci est dû à leur grande

IV *(suite)*

No.	en milliéquivalents pour 100 g de sol				Total C.E.C. x 100	Cations en % de la capacité d'échange de cations				Surface M2/g	pH (séché)	Humus %	$CaCO_3$+ CaMg $(CA_3)_2$ %
	MgO	Mn	Total	C.E.C.		K %	Na %	Ca %	Mg %				
979	1.3	tr	9.90	14.2	70	2.3	1.3	57.0	9.2	56	5.7	0.9	0
394	1.1	tr	29.49	29.3	101	1.7	1.0	94.2	3.8	115	8.1	1.0	0.2
401	2.6	tr	21.40	19.6	109	2.7	3.4	79.6	13.3	80	8.2	0.7	12.2
L-22	3.2	tr	+ 45.55	42.4	107	1.6	2.1	+ 96.2	7.5	210	7.9	0.1	0.6
155	7.2	0.1	44.24	47.4	93	1.4	0.8	75.7	15.2	185	6.5	9.5	0.1
193	8.8	0.1	34.71	41.0	85	3.1	0.6	59.3	21.5	238	6.9	0.9	0.1
644	9.1	tr	+ 66.73	65.6	102	1.0	0.7	86.1	13.9	304	8.3	0.8	6.6
V	0.8	tr	10.08	57.9	17	1.6	0.8	13.7	1.4	198	4.2	22.3	0

teneur en humus dont la capacité d'échange des cations varie de 150 à 300 milliéquivalents pour 100 mg.

2º *Cations échangeables* : Les sols de surface, ainsi que le sous-sol non marbré des pentes de la forêt de Chaux contiennent principalement du Mg sous forme échangeable (10 à 15 p. 100 du total de la C. E. C. ; il y a 4 à 7 p. 100 d'ions Ca, 1 à 3 p. 100 d'ions K, et 1 à 5 p. 100 d'ions Na. L'examen microscopique montre que la fraction $>$ 2 microns de la forêt de Chaux contient beaucoup de quartz, et peu de feldspath sodique et potassique. La fraction $<$ 2 microns, au contraire, plus exposée à la désintégration, comprend, outre le quartz, beaucoup de chlorite (silicate minéral Mg-Fe-Al). Les minéraux contenant du calcium et du potassium, exception faite d'un peu d'illite et d'interstratifié, ne s'y trouvent pas (pour détails voir l'article sur la composition minérologique de l'argile et ses transformations par VAN DER MAREL, à paraître).

Les sous-sols très lourds du plateau ainsi que les sols à 20 cm du monticule (ancien sous-sol marmorisé) contiennent plus d'ions Ca échangeables (jusqu'à environ 20 p. 100) et moins d'ions Mg échangeables. Ainsi le rapport Mg/Ca pour les sols de surface (et le sous-sol brun des pentes), 1,5 à 3 diminue jusqu'à 0,5 à 1 pour les sous-sols très lourds et le sol de monticule.

Les sols relativement acides de la forêt de Chaux ont seulement 17 à 40 p. 100 de leur capacité d'échange de cations saturés par K, Ca, Mg (et faiblement Mn). L'autre part est constituée par des ions H^+ et des ions complexes comme Al $(OH)_2^+$, Al $(OH)^{++}$, etc. ; ces derniers sont d'une allure encore plus covalente (et moins ionique) que Mg, Ca (et Mn) ; ainsi ils sont fortement adsorbés par le sol. Les argiles latéritiques contiennent également la même quantité (ou plus), d'ions échangeables Mg que de Ca ; ceci est dû au caractère plus covalent du premier que du dernier, d'où résulte l'accumulation en Mg dans les sols très pauvres

comme ceux du type latéritique. Le sol latéritique de Sumatra contient en plus beaucoup d'ions échangeables Mn ; il s'est formé par la désintégration d'une roche mère volcanique de rhyolite, c'est-à-dire une roche acide, contenant beaucoup de biotite (minéral non résistant contenant 10 p. 100 K_2O, 10 p. 100 Mgo et d'un type local riche en manganèse : environ 0,3 p. 100 Mn_3O_4) : Ici encore les ions avec un caractère plus covalent, se sont davantage accumulés dans le sol que les ions échangeables, tandis que le potassium qui présente un caractère plus ionique ne fut trouvé qu'en quantités faibles.

L'argile marine de Steenbergen (Pays-Bas) contient beaucoup de Na et Mg, ce qui est dû à l'ancienne submersion par la mer. Dans d'autres sols marins, le Na et Mg sont remplacés par le Ca. Ce dernier provenant de la destruction du $CaCO_3$ qui se trouve aussi dans les argiles marines. On a souvent supposé que l'adsorption des ions par l'argile suit la loi de l'équilibre de Donnan pour membranes :

$$\frac{(K_i^+)}{(K_a^+)} = \sqrt{\frac{(Ca_i^{++})}{(Ca_a^{++})}} = \frac{(Cl_a^-)}{(Cl_i^-)} = \sqrt{\frac{(SO_{4a}^{--})}{(SO_{4i}^{--})}} = K \quad \text{où}$$

K_i^+ = activité des ions K adsorbés
K_a^+ = activité des ions K dans la solution du sol.

De sorte que si la solution dans le sol est diluée, les cations monovalents et les anions divalents passent de la forme adsorbée vers la solution (et l'inverse). En vérité, les processus qui déterminent l'adsorption des ions se trouvant dans la solution du sol sont plus complexes. Ainsi l'énergie d'adsorption des diverses ions par l'argile dépend de l'affinité des argiles pour les différents cations, de la quantié de l'ion déjà adsorbée et de la concentration (absolue et relative) des ions dans la solution du sol (MELSTED et BRAY, 1947 ; LAWRENCE, 1958 ; BLANCHET, 1959). Ainsi Ca^{++}, Mg^{++} sont plus fortement adsorbés que K^+ par les argiles kaolinitiques. Cependant l'inverse a lieu si l'argile contient une illite dégradée. De même la concentration de Na^+ et Mg^{++} dans la mer est plus élevée que celle de K^+, ce qui provoque l'adsorption des ions Na^+ et Mg^{++} par les argiles submergées. Ainsi, les rapports entre les divers ions échangeables donnent donc, compte-tenu de leurs caractéristiques (covalente ou ionique), de leurs concentrations dans la solution et de la nature de l'argile, un bon aperçu sur la genèse du sol et sur son comportement dans le milieu et le climat où il se trouve.

Dans la figure 18, les capacités d'échange de cations des divers sols sont comparés à leur surface spécifique en m^2/g. On y constate un rapport étroit entre ces deux caractéristiques. Les sols latéritiques, les *terra rossas* et le sol tourbeux font exception : les premiers contiennent beaucoup de sesquihydroxydes et d'acide silicique amorphes ayant une grande surface spécifique (200 à 200 m^2/g) mais avec une faible capacité d'échange de

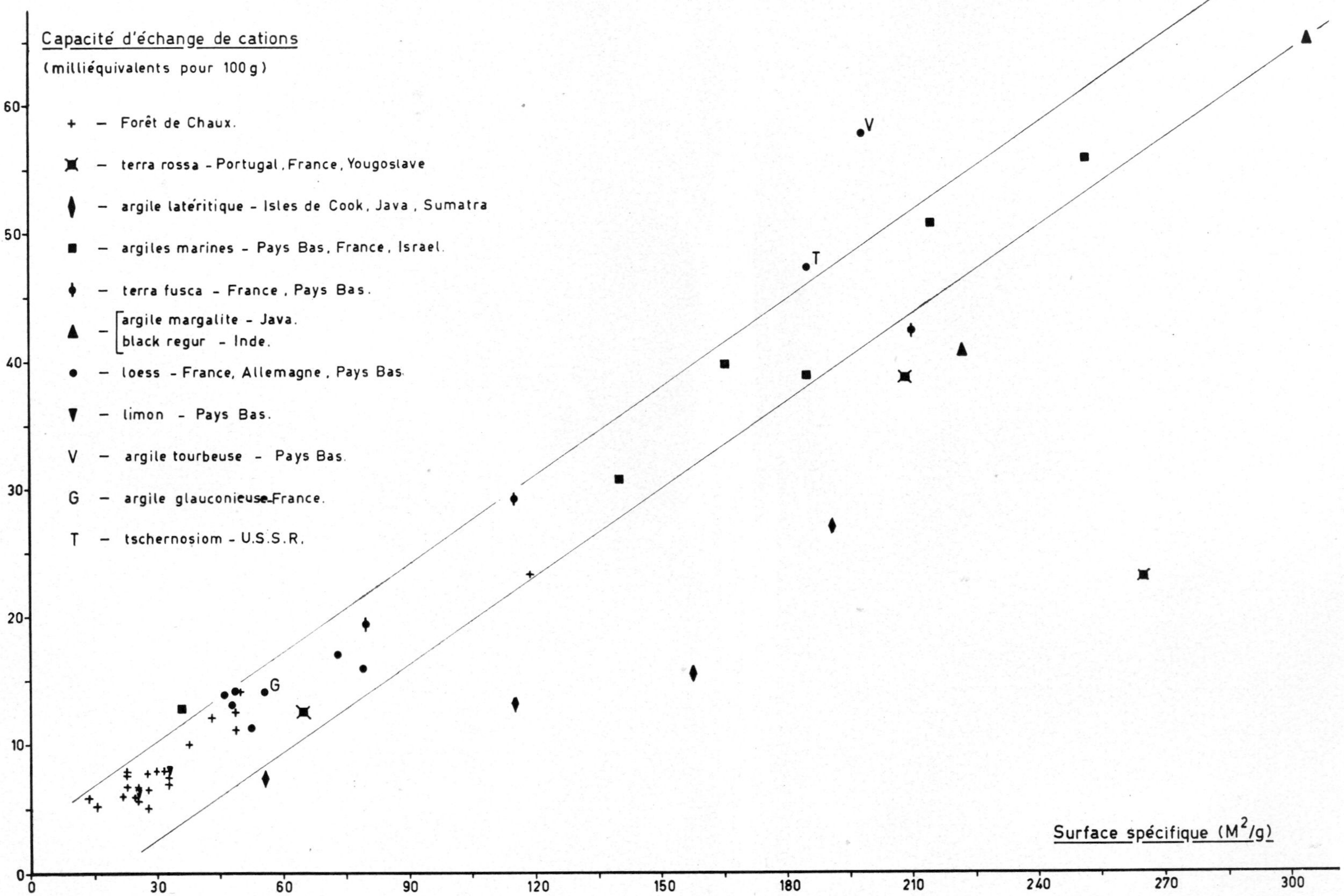


FIG. 18. — Capacité d'échange de cations et surface spécifique de divers sols de la Forêt de Chaux et d'autres types de sol de l'étranger.

cations (inférieure à 40 *me*). ; le sol tourbeux contient beaucoup d'humus, lequel a un fort pouvoir d'absorption des cations (pouvoir rapporté à l'unité de surface spécifique : 0,5 à 1 milliéquivalents pour 100 m^2/g).

HUDIG et ROBORGH attiraient l'attention dès 1936 sur le comportement uniforme de la capacité d'échange des cations des argiles. Ce phénomène fut alors découvert dans un certain nombre de sols argileux néerlandais de différents types. La capacité d'adsorption fut comparée à la quantité de particules < 2 microns déterminée par une analyse granulométrique. On ne connaissait pas encore la méthode Dyal-Hendricks (1950) ou la méthode du microscope électronique (postérieure à 1940) pour mesurer la surface spécifique. Cette identité de comportement de la capacité d'échange de cations fut imputée par les auteurs ci-dessus à la formation d'une couche amorphe entourant les particules d'argile et d'une composition constante ; cette couche aurait la consistance d'une permutite synthétique ordinaire et tout comme une permutite, aurait le pouvoir d'échanger des cations. Ceci par suite de remplacement isomorphe de Si^{++++} par Al^{+++}, d'où résulte une valence négative capable de faire une liaison échangeable avec divers cations.

La figure 18 permet de calculer qu'environ 23 *me.* pour 100 g de sol sont adsorbés par 100 m^2 de surface spécifique (par 1 g de sol). La surface occupée par un cation monovalent est donc d'environ 72 $Å^2$. JAHNSON et LAWRENCE (1942) trouvèrent que la surface occupée par un cation monovalent de kaolinite est 83 $Å^2$ (méthode au microscope électronique), MORTLAND (1954) trouva une surface de 95 $Å^2$ pour une argile d'illite et de kaolinite (surface calculée par la méthode Dyal-Hendricks à l'éthylène-glycol). VAN DER MAREL (1960) trouva une surface de 67 $Å^2$ chez 12 kaolinites pures provenant de 8 pays différents. Cette dernière valeur est à peu près la même que celle trouvée par la même méthode pour tous les sols étudiés dans le présent mémoire bien que leur origine et leur composition minéralogique en soit très différentes.

IV — 1 : Perte au feu. Humus et azote.

Technique opératoire :

Perte au feu : Chauffage à 800° C.

Humus : Méthode KURMIES (1949) qui consiste dans l'oxydation de la matière organique avec un mélange de $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$.

Azote : Méthode de destruction de la matière organique avec le sélénium + $CuSO_4$ comme catalyseur. Après la destruction, le contenu de la cornue est filtré, puis la teneur en azote est déterminée dans le filtrat par distillation, après addition de MgO.

TABLEAU V

Perte au feu, humus, azote et quotient humus/azote de quelques types de sol de la forêt de Chaux et de l'étranger.

No.	Description (profondeur en cm)		Perte de feu %	Humus %	Azote %	Humus / Azote
7	II/14: mauvais vide à molinie sur sol à similigley - surf.		8.29	6.81	0.202	34
25	VIII/25: sol de plateau	surf.	5.38	3.06	0.118	26
26	sur sous-sol	20	3.61	1.61	0.076	21
27	marbré: beau	35	3.34	1.22	0.087	14
28	peuplement	140	7.66	0.49	0.050	10
418	III/1: sol de plateau sur sous-sol marbré	5 - 10	4.90	3.19	0.115	28
393	très belle hêtraie de conversion	50 - 55	3.53	0.23	0.021	11
11	I/14: sol de plateau	surf.	3.87	2.79	0.098	28
12	sur sol marbré	12 - 15	2.85	1.39	0.053	26
13		30 - 35	2.40	0.83	0.036	23
14		50 - 55	3.13	0.54	0.028	19
15		90 - 95	3.88	0.60	0.059	10
16		130-135	4.02	0.58	0.048	12
21	I/28: très belle futaie sur sol brun	surf.	7.01	4.38	0.151	29
22	des pentes	20	4.44	2.46	0.098	25
23	sans hydromorphie	60	3.01	0.68	0.054	13
19	Chaux X-751 belle futaie parcelles voisines	15 - 25	4.80	3.02	0.115	26
20	de conversion séparées par	35 - 45	3.30	1.07	0.090	12
17	Fourg.2 - vide à un chemin	15 - 25	7.23	4.98	0.193	26
18	molinie	35 - 45	3.79	1.61	0.101	16
33	Parcelle sol de charmaie	15	6.59	4.92	0.182	27
34	XVIe série sol de moliniaie	15	8.49	6.54	0.189	35
4	Baraque Jupilles surface		4.00	2.48	0.090	28
5	belle futaie juste au dessous du marbré		2.71	0.75	0.039	19
6	artificielle de 1820 juste en dessous dans le marbré		2.70	0.72	0.039	18
29	sol de fourmilière	0 - 20	6.50	4.88	0.234	21
32	sol noir de prairie	0 - 20	12.01	3.86	0.231	17
37	déjections de lombrics	0 - 20	10.46	8.33	0.274	30
L-165	limon-Zwalmen, Pays-Bas	0 - 20	3.72	1.45	0.098	15
603	limon-Lieusant, France	0 - 20	4.58	1.64	0.112	15
405	limon-Aspach Le Bas, France	0 - 20	4.24	1.51	0.106	14
2189	loess-Hannover, Allemagne	0 - 20	4.42	2.12	0.143	15
1192	loess-Limburg, Pays-Bas	0 - 20	3.50	2.77	0.163	17
999	terre glauconieuse-Rarécourt, France	0 - 20	4.66	1.94	0.129	15
1302	argile de la Meuse, Wamel, Pays-Bas	0 - 20	10.48	4.16	0.300	14
390	argile de Rhin, Alsace, France	0 - 20	*13.92	2.22	0.126	17
518	argile marine, Veurne, Belgique	0 - 20	* 4.41	1.42	0.115	12
771	argile marine, Wagenborgen, Pays-Bas	0 - 20	8.77	2.59	0.216	12
155	tchernosiom, Woronesh, U.S.S.R.	0 - 20	14.97	9.47	0.473	20
697	sol de prairie, Harpster, U.S.A.	0 - 20	*15.86	6.44	0.370	17
J-S23	rendzine, Bosnia, Jugo Slavia	0 - 10	22.50	13.34	0.723	18

* contiennent (beaucoup) de $CaCO_3$ (et de $CaMg(CO_3)_2$).

Résultats.

Le tableau V montre que les teneurs en matière organique et en humus des mauvais vides à molinie sont nettement plus élevées que celle des sols ordinaires. De même pour les déjections de lombrics.

La pénétration de la matière organique dans le sous-sol est, pour le sol de moliniaie, plus forte que pour le sol de hêtraie, d'où une rétention d'eau plus élevée (voir aussi les mesures de pF).

Le quotient Humus/Azote des sols de surface boisés est de 26 à 29, et celui des sols de surface de moliniaie 34 à 35 : la différence n'est pas très forte.

Les sols de divers autres pays ont un quotient de 14 à 20 : ce sont ou des sols agricoles qui sont mieux aérés que les sols boisés ou, des sols latéritiques soumis à une température plus élevée que ceux du Jura.

IV — 2 : P_2O_5 organique.

Technique opératoire :

Le P_2O_5 est déterminé par la méthode à l'eau oxygénée de VAN DER MAREL (1935). On détermine la différence entre la quantité de P_2O_5 de 25 g de sol dissoute dans l'HCl de poids spécifique 1,035 (à environ 7 p. 100) et du même sol préalablement traité avec de l'eau oxygénée à 15 p. 100 (environ 200 cc). Pour annuler l'action des composés du manganèse sur la décomposition de l'eau oxygénée, les sols sont traités préalablement avec 50 cc d'acide acétique à 2 p. 100. La détermination du P_2O_5 dissous par HCl est décrite au chapitre IV-5.

Résultats.

Le tableau VI montre que tous les sols de la forêt de Chaux sont *très pauvres* en P_2O_5, soluble dans HCl à 7 p. 100 et dans HCl à 25 p. 100.

On constate que le P_2O_5 *organique y est relativement abondant* par rapport au P_2O_5 inorganique. Avec la profondeur, la quantité de P_2O_5 organique diminue rapidement. La teneur de l'humus en P_2O_5 organique mesurée par $\frac{\text{p. 100 } P_2O_5 \text{ organique}}{\text{p. 100 Humus}}$ est environ de 0,4 à 1,1 p. 100. Pour d'autres sortes de sols ce rapport atteint 3 p. 100. Le quotient $\frac{\text{p. 100 } P_2O_5 \text{ organique}}{\text{p. 100 } P_2O_5 \text{ dans 25 \% HCl}}$ varie dans les sols de surface de la forêt de Chaux de 0,40 à 0,90 p. 100. Il diminue avec la profondeur.

Par l'action des facteurs climatiques et de l'activité microbiologique, le P_2O_5 du sol est transformé en P_2O_5 assimilable par les végétaux (NEUBAUER, 1953 ; BERTRAMSON et STEPHENSON, 1942 ; PIERRE, 1948 ; EID et al., 1951 ; PICCI, 1954 ; LARSEN et al., 1958). Une température

TABLEAU VI

P_2O_5 dans 7 % HCL, P_2O_5 dans 25 % HCL, P_2O_5 organique, Humus, Quotients % P_2O_5 organique/% Humus et % P_2O_5 organique/% P_2O_5 en 25 % HCL pour quelques sols de la Forêt de Chaux et de l'étranger.

No.	Description (profondeur en cm)		Humus %	P_2O_5 7% HCl %	P_2O_5 25% HCl %	P_2O_5 Organique %	P_2O_5 organ. / Humus (x100)	P_2O_5 organ. / 25% HCl (x100)
416	II/14: mauvais vide de moliniaie	0-20	4.95	0.004	0.018	0.020	0.4	111
25	VIII/25: beau peuplement	surf.	3.06	0.010	0.044	0.019	0.6	43
420	sur sol de plateau	0-20	1.32	0.003	0.015	0.006	0.5	40
418	III/1: sol de plateau avec très belle hêtraie de conversion	5-10	3.19	0.008	0.024	0.018	0.6	75
11	I/14: sol de plateau	surf.	2.79	0.007	0.023	0.011	0.4	48
13		30-35	0.83	0.003	0.011	0.003	0.4	27
15		90-95	0.60	0.006	0.026	0.003	0.5	12
4	Baraque Jupilles: Belle futaie artificielle sur sol de plateau avec sous-sol marbré	surf.	2.48	0.010	0.040	0.027	1.1	68
21	I/28: sol brun des pentes non	surf.	4.38	0.010	0.042	0.026	0.6	62
51	marmorisé avec très belle	20	2.46	0.010	0.030	0.012	0.5	40
52	futaie	60	0.68	0.012	0.032	0.005	0.7	16
433	Chaux X-751 (Belle deux parcelles	0-20	4.95	0.009	0.022	0.020	0.4	91
19	futaie de conversion séparées par	15-25	3.02	0.006	0.014	0.008	0.3	57
437	Fourg.II: vide de un chemin	0-20	4.76	0.008	0.024	0.020	0.4	83
17	moliniaie	15-25	4.98	0.008	0.022	0.016	0.3	73
376	Monticule en place depuis 100 ans M.F.Grand Contour, brun en surface	surf.	0.43	0.010	0.028	0.004	0.9	14
603	limon (loess) Lieusaint, France	0-25	1.64	0.086	0.110	0.025	1.5	23
405	limon (loess) Aspach le Bas, France	0-25	1.51	0.075	0.118	0.025	1.6	21
2190	loess, Hannover, Allemagne	0-25	1.89	0.106	0.146	0.042	2.2	29
1192	loess, Limburg, Pays-Bas	0-25	2.77	0.038	0.081	0.050	1.8	62
999	argile glauconieuse, Rarécourt, France	0-25	1.94	0.042	0.075	0.034	1.7	45
57	terra fusca-Limburg, Pays-Bas	0-25	1.81	0.050	0.084	0.051	2.8	61
401	terra fusca-Nancy, France	0-25	0.72	0.069	0.112	0.032	4.4	29
81	rendzine, Limburg, Pays-Bas	0-25	3.71	0.070	0.142	0.081	2.2	57
JS-23	rendzine, Bosnie, Yougo-Slavie	0-10	13.34	0.018	0.160	0.170	1.3	106
771	argile marine, Wagenborgen, Pays-Bas	0-25	2.59	0.090	0.115	0.052	2.0	45
518	argile marine, Veurne, Belgique	0-25	1.42	0.087	0.111	0.030	2.1	27
1302	argile de la Meuse, Wamel, Pays-Bas	0-25	4.16	0.063	0.125	0.066	1.6	53
390	argile du Bas Rhin, Alsace, France	0-25	2.20	0.074	0.108	0.039	1.8	36
155	tchernoziom, Woronesh, U.S.S.R.	0-30	9.47	0.034	0.118	0.101	1.2	86
25-18	tchernoziom, Slavonia, Yougo-Slavie	0-20	2.28	0.105	0.165	0.069	3.0	42
955	sol latéritique, Iles de Cook	0-20	4.12	0.018	0.070	0.038	0.9	54
780	sol latéritique, Timor, Indonesie	0-10	3.44	0.048	0.236	0.054	1.6	23
JS-27	terra rossa, Grna-Gora, Yougo-Slavie	0-20	3.36	0.008	0.096	0.070	2.1	73
895	argile andésitique, Gloegoer, Sumatra	0-25	8.25	0.164	0.216	0.166	2.0	77
697	prairie soil, Harpster, U.S.A.	0-20	6.44	0.098	0.152	0.070	1.1	46
486	prairie soil, Houston, U.S.A.	0-20	3.00	0.051	0.071	0.022	0.7	31
413	black regur, Jalgoon, India	0-30	0.98	0.104	0.125	0.007	0.7	6

élevée accélère cette réaction (EID et al., 1951). La détermination de P_2O_5 organique est de grande utilité pour juger des besoins de P des sols tropicaux (VAN DER MAREL, 1947) et des similigleys toujours très pauvres en P_2O_5 inorganique. Mais sous climats tempérés le P_2O_5 organique joue aussi un rôle en alimentant le végétal en phosphate. L'intérêt porté à cette question s'est accru ces derniers temps (voir bibliographie récente de ULRICH et BENZLER, 1955).

IV — 3 : Fixation de P.

Technique opératoire :

Le sol (20 g) reste dans une cornue au contact avec 200 cc de KH_2PO_4; qui contient 100 mg de P_2O_5, pendant 24 heures; le tout dans un thermostat à 27°C. Pendant la journée on secoue les cornues à plusieurs reprises. On filtre et détermine le P_2O_5 du filtrat.

Résultats.

Le tableau VII montre que la capacité de fixation de P est pour les sols de surface de 23 p. 100 à 30 p. 100. Toutefois, cette capacité, pour les terres de fourmilières, n'est que de 9 à 20 p. 100, et pour les déjections de lombrics de 17,6 p. 100 du fait de leur richesse en matière organique.

La fixation de P augmente avec la profondeur. Dans les sous-sols fortement compacts elle atteint 48 p. 100 comme pour les *terra rossa* et les latérites (riches en sesquihydroxydes, mais également pauvres en P.). Ce sont donc des sols qui ont un très grand besoin de fumure phosphatée. On sait que l'assimilation de P par le végétal, s'effectue très difficilement quand le taux de fixation est élevé. Ajoutons encore que le P se fixe en surface, et par conséquent ne peut être absorbé par les racines des arbres lesquelles se trouvent dans le sous-sol. Il faut donc fumer avec de très grandes quantités de P pour obtenir un résultat, et mettre l'engrais au niveau convenable, par exemple avec une motoplanteuse Stihl qui brasse le sol et diffuse l'engrais dans la masse.

IV — 4 : Fixation de K.

Technique opératoire.

a) *Fixation de* K *en milieu humide* : 25 g de sol sont agités avec une solution de 400 cc de KCl (contenant 100 mg de K_2O) pendant 24 heures à la température ambiante. On secoue plusieurs fois à la main au cours de la journée. Puis on agite mécaniquement par retournement, on filtre à fond et on percole goutte à goutte par 3 fois 50 cc une solution d'acétate de Mg demi-normale. Le K du filtrat est déterminé. La teneur trouvée est corrigée de la quantité

K_2O, CaO, MgO, P_2O_5, Mn_3O_4, Fe_2O_3, Al_2O_3, SiO_2 (%) et $\frac{SiO_2}{Fe_2O_3 + Al_2O}$, $\frac{Fe_2O_3}{Al_2O_3}$, $SiO_2 - Fe_2O_3 + Al_2O_3$ (mol.) *par extraction du sol avec* HCL *à 25 % 1 heure*

No.	Description (profondeur en cm)			Surf. (M2/g)	K_2O (%)	fixation de K humide (%)	fixation de K sèché (%)
7	II/4: mauvais vide à		surf.	33	0.014	4	6
8	molinie sur sol	juste au dessus du marbré		20	0.012	8	11
9	à similigley	juste en dessous du marbré		23	0.014	10	13
580	XII/15: mauvais vide à	dans le	80	28	0.024	10	32
296	molinie sur sol à similigley	marbré	110	49	0.020	9	34
25	VIII/25: sol de plateau sur	brun	surf.	26	0.024	8	25
26	similigley en	-d°-	20	23	0.032	10	20
27	profondeur avec	-d°-	35	20	0.028	14	18
518	beau peuplement	marbré	80	33	0.028	7	29
28		-d°-	140	109	0.024	33	54
418	III/1: belle hêtraie de	brun	5- 10	33	0.020	16	20
393	conversion	marbré	50- 60	76	0.024	20	28
4	Baraque Jupilles belle		surf.	26	0.016	10	13
5	futaie artificielle	au dessus du marbré		23	0.024	10	29
6	des 1820	dans le marbré		23	0.026	10	30
374	I/14: limon de plateau	brun-gris	0- 15	26	0.018	6	8
413	sur sous-sol	faibles marbrures	20- 25	26	0.019	9	12
375	marmorisé	plus contrasté	40- 45	53	0.012	12	23
419		ocre avec veines décolorées	120-145	66	0.016	20	46
395		induré ocre, veines plus rares	155-190	98	0.018	25	58
50	I/28: sol brun des pentes	brun	surf.	26	0.032	8	14
51	sans hydromorphie,	-d°-	20	26	0.012	9	22
52	avec beau peuplement	-d°-	60	23	0.018	11	24
582		-d°-	80	33	0.022	11	37
1	M.Forest: monticule datant	au milieu du brun	20	40	0.034	8	24
2	de 100 ans	dans le marbré juste au bord		20	0.034	10	22
3		dans le marbré		30	0.028	10	25
433	Chaux X-751: belle hêtraie	brun, gris	0- 20	36	0.012	10	12
434	de conversion	beige décoloré	20- 40	30	0.012	10	14
436		ocre induré	60- 80	33	0.016	9	18
437	Fourg. II: vide à molinie	gris-noir	0- 20	46	0.016	1	1
438		très pâle, ocre	20- 40	40	0.016	2	8
440		quelques marbrures	60- 80	38	0.014	12	21
2187	fond d'étang		0- 15	73	0.040	10	22
29	sol de fourmilière		0- 15	40	0.012	2	4
31	sol de butte de chablis (10 ans)		0- 15	26	0.028	6	18
32	sol noir de prairie		0- 15	49	0.012	16	32
37	déjections de lombrics		0- 15	40	0.016	0	1

à environ 100° C. SiO_2 *pendant 15 minutes avec* NaOH *(p. sp. 1.040 à 55° C).*
Fixation de K *(humide et sèche), fixation de* P. *Surface spécifique du sol en* M^2/g.

No.	CaO (%)	MgO (%)	P_2O_5 (%)	fixation de P (%)	Mn_3O_4 (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	$\frac{SiO_2}{Fe_2O_3+Al_2O_3}$ (mol.)	$\frac{Fe_2O_3}{Al_2O_3}$ (mol.)	$SiO_2-(Fe_2O_3+Al_2O_3)$ (mol.)
7	0.035	0.082	0.012	34.4	0.002	0.90	1.10	1.09	1.11	0.52	+ 1.7
8	0.036	0.110	0.016	22.2	<0.001	0.87	1.16	1.25	1.15	0.59	+ 2.7
9	0.030	0.121	0.014	23.8	<0.001	1.68	1.36	1.56	1.09	0.79	+ 2.1
580	0.028	0.125	0.014	35.9	0.006	2.13	2.08	1.65	0.82	0.65	- 6.2
296	0.038	0.106	0.026	40.7	0.008	3.80	2.18	2.30	0.84	1.11	- 6.9
25	0.018	0.114	0.033	28.1	0.003	1.92	1.25	1.28	0.87	0.98	- 3.0
26	0.024	0.107	0.028	31.5	0.003	1.78	1.54	1.44	0.91	0.74	- 2.3
27	0.022	0.118	0.025	31.8	0.001	1.87	1.59	1.45	0.88	0.75	- 3.3
518	0.018	0.149	0.030	29.0	0.040	1.75	1.50	1.10	0.71	0.75	- 7.4
28	0.197	0.124	0.020	58.2	<0.001	4.97	2.88	3.16	0.89	1.10	- 6.8
418	0.038	0.095	0.024	26.6	0.006	1.26	0.80	0.86	0.91	1.01	- 1.4
393	0.018	0.068	0.028	48.6	0.001	2.90	1.80	2.25	1.05	1.03	+ 1.6
4	0.057	0.111	0.040	22.8	0.007	1.66	1.09	1.08	1.17	0.97	- 3.1
5	0.045	0.128	0.024	24.5	0.002	1.94	1.58	1.96	1.18	0.78	+ 5.0
6	0.023	0.148	0.024	25.3	0.001	2.26	1.90	2.28	1.16	0.76	+ 5.1
374	0.016	0.098	0.022	29.7	0.002	1.21	1.57	1.20	0.87	0.50	- 2.9
413	0.018	0.085	0.014	27.2	0.001	1.18	1.81	1.39	0.92	0.42	- 2.0
375	0.013	0.093	0.012	31.1	0.001	2.32	1.31	1.31	0.80	1.13	- 5.6
419	0.045	0.100	0.028	39.1	0.001	3.12	1.98	2.06	0.88	1.01	- 4.6
395	0.098	0.095	0.019	38.6	0.001	3.19	1.44	1.68	0.82	1.41	- 6.1
50	0.025	0.095	0.042	27.4	0.007	1.80	1.73	1.55	0.92	0.66	- 2.4
51	0.024	0.146	0.030	27.9	0.030	1.76	1.26	1.47	1.03	0.85	+ 0.6
52	0.020	0.158	0.032	31.8	0.052	1.88	1.35	1.49	0.99	0.89	- 0.2
582	0.016	0.197	0.032	32.6	0.098	2.00	1.88	1.35	0.73	0.68	- 8.4
1	0.039	0.145	0.024	40.3	<0.001	3.19	1.91	2.48	1.07	1.07	+ 2.6
2	0.034	0.148	0.017	35.2	0.001	1.72	1.56	1.60	1.02	0.70	+ 0.5
3	0.027	0.155	0.022	34.7	0.001	2.90	1.81	2.08	0.96	1.02	- 1.3
433	0.049	0.091	0.022	33.4	0.010	1.81	0.63	0.97	0.92	1.83	- 1.3
434	0.012	0.076	0.013	33.7	0.010	1.29	0.98	1.02	0.96	0.84	- 0.7
436	0.012	0.118	0.014	35.2	0.010	2.45	1.73	1.80	0.93	0.91	- 6.5
437	0.011	0.120	0.024	33.1	0.014	1.93	0.92	1.21	0.96	1.34	- 0.9
438	0.012	0.116	0.017	36.1	0.012	1.32	1.75	1.48	0.97	0.48	- 0.8
440	0.011	0.110	0.014	48.8	0.011	3.68	2.41	2.28	0.91	0.98	- 8.7
2187	0.309	0.233	0.040	25.6	0.012	1.72	2.16	3.60	1.87	0.51	+ 27.9
29	0.207	0.120	0.051	12.1	0.002	1.62	1.03	1.21	0.99	1.00	- 0.1
31	0.045	0.136	0.018	25.4	0.010	1.53	1.26	1.65	1.25	0.78	+ 5.5
32	0.744	0.169	0.055	26.4	0.001	2.34	0.78	1.31	0.97	1.92	- 0.5
37	0.314	0.116	0.073	17.6	0.008	1.03	0.73	1.25	1.53	0.90	+ 7.2

TABLEAU

No.	Description (profondeur en cm)		Surf. (M2/g)	K_2O (%)	fixation de K humide (%)	fixation de K sèché (%)
599	loess décalcifié, Croissy s. Eure, France	0- 20	49	0.056	23	66
603	loess décalcifié, Lieusant, France	0- 20	48	0.076	15	40
405	limon (loess décalc.) Aspach le Bas, France	0- 20	53	0.048	14	52
190	loess, Hannover, Allemagne	0- 20	73	0.112	24	58
1192	loess, Limburg, Pays-Bas	0- 20	53	0.140	32	43
165	limon, Zwalmen - Pays-Bas	0- 20	33	0.045	12	33
390	Basse terrasse du Rhin, Alsace-France	0- 20	46	0.094	2	36
1302	Argile de la Meuse, Wamel - Pays-Bas	0- 20	195	0.072	88	93
627	Argile du Schelde, Gent - Belgique	0- 20	53	0.100	18	58
771	Argile marin, Wagenborgen - Pays-Bas	0- 20	142	0.220	8	50
426	Terra rossa, Rochefort - France	0- 20	65	0.008	13	33
520	Terra rossa, Almoster - Portugal	0- 20	129	0.072	20	56
S-27	Terra rossa, Grna Gora - Jugo-Slavie	0- 20	265	0.076	37	54
773	Argile latéritique, Sepandjang, Indonesie	0- 20	122	0.048	25	44
780	Argile latéritique, Timor, Indonesie	0- 20	119	0.008	22	36
999	Terre glauconieuse, Rarécourte - France	0- 20	109	0.236	18	34
173	Argile glaciale, Finland	0- 20	76	0.396	40	78
155	Tchernoziom, Woronesh, U.S.S.R.	0- 20	185	0.242	18	45
JS-18	Tchernoziom, Slavonia - Jugo-Slavie	0- 20	180	0.136	19	52
408	Black regur, Jalgoon, India	0- 20	195	0.112	37	58
401	Terra fusca, Nancy - France	0- 20	80	0.325	50	79

de K échangeable se trouvant dans l'échantillon. Ce dernier est déterminé en opérant de façon identique sur un autre échantillon mais en remplaçant les 400 cc de la solution de KCl par 400 cc d'eau.

b) *Fixation de* K *en milieu sec* : 25 g de sol sont séchés à 70° C après addition de 25 cc de KCl contenant 100 mg de K_2O. On secoue ensuite pendant une heure mécaniquement. Puis on opère de la manière indiquée ci-dessus (pour détails voir VAN DER MAREL 1954).

Résultats.

Le tableau VII montre que le *pouvoir de fixation de K des sols de la forêt de Chaux est faible*. Le sol de lombrics ne fixe pas du tout de K. En profondeur, le pouvoir de fixation augmente généralement : la cause principale en est l'augmentation de la teneur en argile. La capacité de fixation des sols peut, dans les cas où l'argile contient beaucoup d'illite ouverte, monter jusqu'à 80 ou 90 p. 100 en fixation humide, et à 95 ou 98 p. 100 en fixation sèche. Si le sol a une très haute fixation les deux chiffres se rapprochent car tout le K ajouté à l'échantillon est fixé.

Une fixation de 100 p. 100 de K correspond ici à une fixation d'environ 3 000 kg de K_2O par ha pour une couche de sol de 25 cm. La faculté de fixer le K est très favorable en agriculture. Cela empêche, en effet,

VII *(suite)*

No.	CaO (%)	MgO (%)	P_2O_5 (%)	fixation de P (%)	Mn_3O_4 (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	$\frac{SiO_2}{Fe_2O_3+Al_2O_3}$ (mol.)	$\frac{Fe_2O_3}{Al_2O_3}$ (mol.)	$SiO_2-(Fe_2O_3+Al_2O_3)$ (mol.)
599	0.344	0.180	0.039	12.2	0.032	2.32	1.33	2.75	1.67	1.12	+ 18.3
603	0.755	0.244	0.110	8.3	0.039	2.20	1.35	2.35	1.45	1.05	+ 12.1
405	0.263	0.415	0.118	18.9	0.007	3.03	1.85	2.48	1.11	1.05	+ 4.2
190	4.240	0.465	0.146	16.0	0.052	1.98	1.	3.69	2.18	0.79	+ 33.2
1192	0.262	0.335	0.082	13.1	0.064	2.35	1.6	3.56	1.91	0.90	+ 28.3
165	0.174	0.252	0.092	8.8	0.018	2.30	1.18	1.53	0.98	1.24	- 0.5
390	10.83	1.29	0.108	6.6	0.003	1.71	1.02	1.95	1.57	1.07	+ 11.8
1302	0.862	0.688	0.125	30.5	0.060	5.38	3.40	6.40	1.59	1.00	+ 39.5
627	1.66	0.321	0.084	12.2	0.030	2.16	1.22	3.29	2.15	1.13	+ 29.3
771	0.810	0.756	0.115	20.1	0.100	4.81	3.01	6.78	1.90	1.02	+ 53.4
426	12.08	0.080	0.067	19.8	0.002	8.93	1.46	0.89	0.21	3.91	- 55.4
520	0.465	0.102	0.018	48.6	0.010	5.60	5.01	3.66	0.72	0.71	- 23.3
S-27	0.440	0.523	0.096	44.3	0.026	6.85	5.98	5.26	0.86	0.73	- 14.0
773	0.223	0.092	0.126	39.5	0.004	13.28	6.63	4.01	0.45	1.28	- 81.7
780	0.188	0.134	0.236	57.0	0.096	11.03	7.69	3.56	0.41	0.92	- 85.2
999	0.965	0.157	0.075	10.1	0.006	2.15	0.91	3.45	2.55	1.50	+ 34.9
173	0.585	1.623	0.121	16.3	0.022	5.71	4.90	8.38	1.66	0.74	+ 55.6
155	1.29	0.823	0.118	22.0	0.024	3.20	4.20	4.64	1.26	0.49	- 16.1
JS-18	0.647	1.060	0.165	17.1	0.040	3.65	2.43	4.98	1.78	0.96	+ 36.2
408	1.20	1.284	0.040	20.3	0.060	6.85	4.25	12.80	2.52	1.03	+ 128.4
401	4.11	1.45	0.112	16.2	0.008	3.48	2.45	6.20	2.25	0.91	+ 57.5

que le potassium soit entraîné par l'eau vers le sous-sol et que par conséquent il ne soit perdu pour les racines superficelles des végétaux annuels (voir CHAMINADE 1934, 1936 ; SCHROEDER 1955 ; VAN DER MAREL et VENEKAMP, 1955 ; DE FERRIÈRE, 1956 ; DE FERRIÈRE et al, 1958 ; VAN DER MAREL, 1959). Par contre, cette propriété influe défavorablement en arboriculture : les racines des arbres ne peuvent pas s'approprier le K fixé en surface (WALSH et CLARK, 1943 ; VAN DER MAREL et VENEKAMP, 1955).

Dans le cas des sols de la Forêt de Chaux, très pauvres en potassium, la faible fixation de K en surface semble donc favorable, pourvu qu'on procède à une fumure potassique si l'on veut pousser la production.

IV — 5 : Extraction avec HCl à 25 p. 100 de K_2O, CaO, MgO, Mn_3O_4, TiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, SiO_2.

Techniques opératoires.

25 g de sol sont chauffés pendant une heure au bain-marie avec 250 cc d'HCl à 25 p. 100. (1) On ajoute ensuite 350 cc de H_2O et l'on filtre. On sépare

(1) On suppose que l'HCl à 25 p. 100 correspond ä une attaque du même ordre de grandeur que celle des racines des plantes, étalée sur un certain nombre d'années, par exemple celui de la vie d'un arbre.

l'acide silicique puis on détermine le K_2O, CaO, etc. dans le filtrat. Le résidu sur le filtre est alors épuisé pendant 15 mn avec 250 cc de NaOH (poids spécifique 1,040) à 55°C. On filtre, et l'acide silicique est séparé du filtrat. Les deux précipités d'acides siliciques sont réunis et on détermine la quantité de SiO_2 selon la méthode de perte de poids HF + H_2SO_4.

Résultats (tableau VII) :

K_2O. *Toutes les teneurs de la forêt sont basses* (de 0,012 p. 100 à 0,034 p. 100) ; particulièrement celles des sous-sols très lourds ; de même celles des sols organiques et de fond d'étang (0,040 p. 100).

CaO. *La teneur en* CaO *de tous les échantillons est basse* (0,012 p. 100 à 0,050 p. 100). Cependant celle des échantillons des sous-sols plus fins est plus élevée (jusqu'à 0,197 p. 100 pour VIII 25).

MgO. Toutes les teneurs sont *assez fortes*, 0,080 à 0,200 p. 100. Le fond d'étang à la teneur la plus élevée (0,233 p. 100).

P_2O_5. *La teneur en* P_2O_5 *est basse.*

Mn_3O_4. *La teneur en* Mn *est faible dans tous les échantillons*, sauf le sol brun des pentes.

Les teneurs en SiO_2, Fe_2O_3 et Al_2O_3 augmentent fortement vers la profondeur. Les sols de surface de mauvais vides donnent une teneur plus basse que les sous-sols et les sols de bonne hêtraie. Cela est dû à la dégradation plus forte dans ces sols pendant la période d'engorgement par l'eau stagnante en milieu organique réducteur (voir III-1).

Le quotient $SiO_2/Fe_2O_3 + Al_2O_3$ (molaire) est bas (0,80 à 1,18) et reste à peu près inchangé dans le profil.

Dans la plupart des cas, les sous-sols très lourds se distinguent par des quotients Fe_2O_3/Al_2O_3 (molaire) plus élevés que les sols de surface correspondants. L'excès de SiO_2 (en milliéquivalents par 100 g), par rapport au $Fe_2O_3 + Al_2O_3$ est faible dans tous les sols (— 8 à + 5). Le sol de fond d'étang forme une exception, donnant $SiO_2/Fe_2O_3 + Al_2O_3 = 1,87$ et $SiO_2 - (Fe_2O_3 + Al_2O_3) = + 27,9$.

Le faible quotient $SiO_2/Fe_2O_3 + Al_2O_3$ montre clairement que *les sols de la forêt sont d'un type très dégradé* et leur pauvreté en éléments nutritifs s'explique. Toutefois les quotients des sols latéritiques (environ 0,4) et celui de la *terra rossa* de Rochefort (0,21) sont encore plus bas que ceux des sols de la forêt de Chaux. Au contraire, le *black regur*, la *terra fusca* et la terre glauconieuse, ont un quotient $SiO_2/Fe_2O_3 + Al_2O_3$ plus élevé (2,2 à 2,5). Ces types de sols sont donc mieux conservés.

De même la différence SiO_2-$Fe_2O_3 + Al_2O_3$ est infime pour les sols de la forêt. On trouve — 8,4 à + 5,1, tandis que les loess de l'Allemagne et des Pays-Bas qui sont encore bien conservés, donnent + 28,3 et 33,2, les loess décalcifiés de Croissy sur Eure et de Lieussaint + 18,3 et +12,1,

le limon (loess décalcifié) d'Aspach le Bas + 4,2, le limon des Pays-Bas — 0,5, les argiles alluviales (fluviales et marines) + 12 à + 53, la *terra fusca* + 57 et le *black regur* même + 128. Au contraire les sols latéritiques qui sont les plus dégradés donnent — 82 à — 85.

En ce qui concerne les matières nutritives les sols de la forêt apparaissent très pauvres (1). La fixation de P des sols de la forêt dans les sous-sols fins et compacts est même d'une valeur comparable à celle des *terra rossa* et des argiles latéritiques, bien connues pour leur grande capacité de fixation.

La richesse en magnésium fait seule exception ; elle dénote la présence dans le sol de chlorite, (silicate d'Al, Fe, et Mg). La chlorite est un minéral très résistant comparativement à d'autres minéraux du sol, qui contiennent des éléments nutritifs pour les racines (biotite, augite, amphibole, feldspaths de Na et de Ca, etc.).

Résumé.

Les analyses physiques ont démontré que les sous-sols lourds et compacts de la forêt de Chaux ont des points communs avec les *tir* gris (Maroc), *black regur* (Inde), margalite (Java), *badob* (Soudan) et les *gumbosol* (Amérique), qui sont bien connus pour leur grande finesse, plasticité et imperméabilité. En outre ces sous-sols ont un volume des pores bien inférieur à celui des couches supérieures.

Les analyses ont aussi démontré que par sèchage, les courbes granulométriques, le pF et les constantes d'Atterberg sont modifiées considérablement. Ce phénomène d'irréversibilité était le plus prononcé pour les sols de moliniaie qui contiennent beaucoup de matière organique et aussi pour les sols lourds argileux non humifères.

Si les sols non marmorisés et les sols marmorisés à similigley sont artificiellement gorgés d'eau stagnante, le potentiel d'oxydo-réduction (Eh en mV) et le coefficient de redox (rH) sont réduits. Dans les périodes humides il en résulte donc une augmentation de la désintégration et par suite un grand appauvrissement des éléments nutritifs par lessivage horizontal. De la forte réduction en particulier dans les sols riches en matière organique résulte la mise en mouvement du Fe et Mn qui

(1) Pour compléter ces analyses il eut été intéressant de faire les analyses de feuilles correspondantes. Certaines seulement ont pu être faites, au Laboratoire de la Société Commerciale des Potasses d'Alsace à Mulhouse. Elles ont montré que pour les chênes mal venants ce sont surtout les teneurs en CaO et P_2O_5 qui sont déficientes. Elles ont montré la pauvreté de la molinie en CaO, la richesse relative du charme, même au bord d'un vide à mauvais sol.

D'autres analyses faites à la Station Agronomique de Dijon ont montré que pour des chênes rouges d'Amérique, plantés à la même date les mieux réussis sont ceux qui ont la plus forte teneur en CaO et P_2O_5. Elles ont montré le pauvreté de la molinie en Ca, Mg, K, P_2O_5. Tout ceci confirme pleinement les analyses de sols et les inductions faites par les forestiers de façon quelque peu intuitive.

Des références bibliographiques sont données en fin de 3e partie sur cette importante méthode peu employée ici, AALTONEN 1950, LEYTON et ARMSON 1955, LEYTON 1956.

peuvent donner des concrétions ferromanganiques : elles sont très caractéristiques du type à similigley et sont formées dans les périodes de sècheresse succédant à celles d'humidité.

Les bases échangeables des sols de la surface de la forêt consistent principalement en magnésium provenant de l'abondante chlorite. Au contraire, le sous-sol très lourd et compact en profondeur, contient moins de magnésium, mais plus de calcium. Environ 60 à 80 p. 100 de la capacité d'échange de cations est occupé par des ions H^+, des ions Fe et Al, et des ions complexes de Fe et Al avec OH qui sont adsorbés plus fortement que les autres ions échangeables.

La surface occupée par les cations des sols de la forêt et aussi d'autres types de sol de l'étranger est d'environ 72 $Å^2/g$ pour chaque cation de valeur monovalente.

L'étude chimique par extraction avec HCl à 25 p. 100 pendant 1 heure à environ 100°C a démontré que tous les sols de la forêt de Chaux, y compris les sols bruns des pentes, étaient très désintégrés et ainsi très pauvres en substances nutritives fondamentales comme le K, le P et le Ca.

Reste à préciser l'action de ces sols sur la végétation, c'est-à-dire leurs défauts, et à savoir quelles sont les possibilités d'amélioration de ces sols pauvres : c'est ce qui fait l'objet de la III^e partie.

Remerciements.

Les auteurs témoignent ici leur reconnaissance à M. le D^r Ingr. FRANC DE FERRIÈRE ancien Directeur des Recherches Agronomiques de la Société des Mines de Potasse d'Alsace, du fait des intéressantes discussions sur la fertilité actuelle et potentielle des sols de la forêt de Chaux. Les auteurs remercient ici aussi les assistants des deux laboratoires pour la grande précision qu'ils ont montrée au cours des diverses analyses. Nommons en particulier MM. H. LABRIE et W. BALKEMA de DELFT et MM. H. VERLINDE et B. BUNSCHOTEN de WAGENINGEN. Nommons aussi M. le D^r J. K. DIXON, Sous-chef du Bureau des Sols à Wellington, Nouvelle Zélande, pour l'envoi de l'argile allophane (II, I).

Enfin, un mot de remerciement revient aussi à M. L. WASTIAUX, de Tourcoing, traducteur hollandais-français, pour sa traduction de la première rédaction néerlandaise de la présente partie qui contenait de nombreux termes et des phrases difficiles pour un profane.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AALTONEN (V. T.). — Die Blatt-analyse als Bonitierungsgrundlage des Waldbodens ; 4th Internatl. *Congr. Soil Sci. Proc.*, Part 1, 229-231, 1950.

AKHROMEIKO (A. J.). — Zur Frage über die Wassereigenschaften des Bodens

im Zusammenhang mit seiner Struktur und Austrocknung. *2th Internatl. Congr. Soil Sci. Moscow Juni* 20-31, 71-75, 1930.

ARENS (R.), KRAMER (F.) et LANGNER (Ch.). — Uber die Bodenstruktur der Wasserhaushalt und die Ertragsfhigkeit von Pseudogleyen und gleyartigen Braunerden. *Zeitschr. Acker und Pflanzenbau,* **107**, 67-98, 1958.

ARNON (D. I .)et HOAGLAND (D. R.). — Corp production in artificial culture solution and in soils with special reference to factors influencing yields and absorption of inorganic nutrients. *Soil Sci.* **50**, 463-486, 1940.

BAILEY (E. H.). — The effect of air drying on the hydrogen-ion concentration of the soils of the United States and Canada, U. S. *Dept. Agr. Techn. Bul.*, **291**, 1932.

BERTRAMSON (B. R.) et STEPHENSON (R. E). — Comparative efficiency of organic phosphoruss and of superphosphate in the nutrition of plants. *Soil Sci.*, **53**, 215-227. 1942.

BLANCHET (R.). — Energie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol en nutrition minérale des plantes. *Ann Agron.*, **10**, 5-52, 125-154, 267-307, 1959.

BLOOMFIEKD (C.). — Leaf leachates as a factor in pedogenesis. *J. Sci. Food Agric.*, **6**, 641-651, 1955.

BLOOMFIELD (C.). — The possible significance of polyphenols in soil formation. *J. Sci. Food. Agricult.*, **8**, 389-392, 1957.

BOWER (C. A.) et TRUOG (E.). — Base exchange capacity determination as influenced by nature of cation employed and formation of basic exchange salts. S. S. S. A. P. 5 (1940), 86-89, 1941.

BOWSER (W. E.) et LEAT (J. N.). — Seasonal pH fluctuations in a grey wooded soil. *Canadian Journ. of Soil Sci.*, **38**, 128-133, 1958.

BOUYOUCOS (G. J.). — The amount of unfree water in soils at different moisture contents. *Soil Sci.*, **11**, 255-259, 1921.

BOUYOUCOS (G. J.). — Directions for making mechanical analyses of soils. *Soil Sci.*, **42**, 225-229, 1936.

BOUYOUCOS (G. J.). — An improved type of soil hydrometer. *Soil Sci.*, **76**, 377-378, 1953.

BIRRELL (K. S.). — Some physical properties of New Zealand volcanic ash soils. *Soil Bureau. Dept. Sci. and Ind. Res. Wellington New. Zealand Publ.*, **52**, 1952.

BOSSETT (W. A.). — Copper vermiculites from Northern Rhodesia. *Amer. Mineral.*, **43**, 1112-1133, 1958.

BRIGGS (L. J.) et McLANE (J. W.). — The moisture equivalent of soils. *U. S. Dept. Agr. Bul.* **45**, 1-23, 1907.

BRIGGS (L. J.) et SHANTZ (H. L.). — The wilting coefficient of plants and its indirect determination. *U. S. Dept. Agr. Plant. Ind. Bul.* 230, 1-83, 1912.

BURROWS (W.) et CORDON (T. C.). — The influence of the decomposition of organic matter in the oxidation-reduction potentials of soils. *Soil. Sci.*, **42**, 1-10, 1936.

CANNON (W. A.) et FREE (E. E.). — Physiological features of roots with special reference to the relation of roots in the aeration of the soil. *Carnegie Instit. Wash. Publ.*, **368**, 1925.

CASAGRANDE (A.). — Research on the Atterberg limits of soil. *Public. Roads.*, **13**, 121-130, 1932.

CASAGRANDE (A.). — Classification and identification of soils. *Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs*, **73**, 783-810, 1947.

CHAMINADE (R.). — Étude des équilibres entre le complex absorbant et les solutions des sols. *Ann. Agronom.*, **4**, 781-792, 1934.

CHAMINADE (R.). — La rétrogradation du potassium dans les sols. *Ann. Agronom.*, **6**, 818-830, 1936.

CHANG (H. T.) et LOOMIS (W. E.). — Effect of carbon dioxide on absorption of water and nutrients by roots. *Plant. Physiol.*, **20**, 221-232, 1945.

CLEMENTS (F. E.). — Aeration and air content : The rôle of oxygen in root activity. *Carnegie Instit. Wash. Publ.*, **315**, 1921.

COLE (J. S.) et MATHEWS (O. R. — Field capacity and minimum point as related to moisture equivalent. S. S. S. A. P. 18 (1953), 247-252, 1954.

COPPER (R.) et RUDOLPH (E. D.). — The rôle of lichens in soil formation and plant succession. *Ecology*, **34**, 805-807, 1953.

CRONEY (D.) ,COLEMAN (J. D.) et BRIDGE (P. M.). — The suction of moisture held in soil and other porous materials. Road Research Technical Paper n°24 W. M. *Stationery Office*. 42 pp. 1952.

CRONEY (D.) et COLEMAN (J. D.). — Soil structure in relation to soil suction (pF). *Journ. of Soil Sci.*, 75-84, 1954.

DANIELSON (R. E.) et RUSSELL (M. B.). — Ion absorption by corn roots as influenced by moisture and aeration. *S, S. S. A. P.*, **21**, (1956), 3-6. 1957.

DAVIS (L. E.). — Measurements of pH with the glass electrode as affected by soil moisture. *Soil Sci.*, **56**, 405-422, 1943.

DE FERRIÈRE (Franc, P. J. J.). — La consommation en potasse des départements français. 6e Congr. *Soil Sci.*, Paris IV (66), 49-456, 1956.

DE FERRIÈRE (Franc. P. J. J.), CAMEZ (Th.) et MILLOT (G.). — Influence des types d'argile des sols et de la pluviosité sur la nutrition potassique du blé. *Ann. Agronom.*, 2, 149-166, 1958.

DE WIT (C. T.) et ARENS (P. L.). — Moisture content and density of some clay minerals and some remarks on the hydratation pattern of clay. *4th Interntl. Congr. Soil Sci. Amsterdam.*, Vol. II, 59-62, 1950.

DE LONG (W. A.) et SCHNITZER (M.). — The capacities of leaf extracts and leaf leachates to react with iron. *S. S. S. A. P.*, **19**, (1954), 360-363, 1955.

DUFRENOY (J.). — Les agents de chélation et leurs usage agricoles. *Journ. d'Agricult. Trop. et. de Botan.* Appl. 1, 482-483, 1954.

DYAL (R. S. et HENDRICKS (S. B.). — Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. *Soil Sci.*, **69**, 421-432, 1950.

EID (M. T.), BLACK (C. A.) et KEMPTHORNE (O.). — Importance of soil organic phosphorus to plant growth at low and high soil temperatures. *Soil. Sci.*, **71**, 361-370, 1951.

ERICKSON (L. C.). — Growth of tomato roots influenced by oxygen in the nutrient solution. *Amer. Journ. Bot.*, **33**, 551-561, 1946.

FLOCKER (W. J. A. V.). — Influence of soil compaction on phosphorus adsorption by tomato plants from an applied phosphate fertilizer. *Soil Sci.* **88**, 247-250, 1959.

FLAIG (W.), SCHARRER (K) et JUDEL (G. K.). —Z ur Methodik der Bestimmung des Redoxpotentiels. *Zeitschr. Pfl. Dün Bod.*, **68**, (13), 97-122, 1955.

GILBERT (S. G.) et SHIVE (J. W.). — The significance of oxygen in nutrient substrata for plants. I. The oxygen requirement. *Soil Sci.*, **53**, 142-152, 1942.

HABIG (F.). — Beigtrag zur Dynamik und Genetik Strauwasserbeeinfluszter Böden. Thesis Han.-Münden, 1953.

HAINES (W. B.). — On the existence of two equilibrium series in soil capillarity phenomena. *Sec. Internatl. Congr. Soil Sci. Mocsow*, June, 20-32, 8-13, 1930.

HAMMOND (L. C.), ALLAWAY (W. H.) et LOOMIS (W. E.). — Effects of oxygen and carbon dioxide levels upon absorption of potassium by plants. *Plant Physiol.*, **30**, 155-161, 1955.

HARTMANN (F.). — Ueber die Bedeutung der mineralogischen Analyse bei

der Kennzeichnung der Standorte von Waldgesellschaften und ihre Leistungsfähigkeit. *Chemie der Erde*. p. 26-51, 1943.

HUBERTY (M. R.) et HAAS (A. R. C.). — The pH of soil as affected by soil moisture and other factors. *Soil Science*, **49**, 455-478, 1940.

HUDIG (J.) et ROBORGH (R. H. J.). — Over het uniforme gedrag van de Nederlandse kleisubstantie bij de omwisselingsreactie. *Landbouwk. Tijdschrft*, **48**, 33-39, 1936.

HUDIG (J.) et SIEWERTSZ VAN REESEMA (N. H.). — Het probleem van de stabiliteit der humusstoffen. Landbouwk. *Tijdschrift*, **52**, 371-398, 529-634, 1940.

HUDIG (J.). — De physische en chemische eigenschappen van het veen. Voordr. 11 e Wet. Bijeenkomst Sectie Nederland Bodenk. Ver. Uitg. Ned. Heide My. 20-33. 1941.

JOHNSON (A. L.) et LAWRENCE (W. G.). — Surface area and its effect on exchange capacity of kaolinite. *J. Amer. Ceram. Soc.*, **25**, 344-346, 1942.

KOHNKE (H.). — The practical use of the energy concept of soil moisture. *S. S. S. A. P.*, **11**, 64-66, 1948.

KROTH (E. M.) et PAGE (J. B.). — Aggregate formation in soils with special reference to cementing substances. *S. S. S. A. P.*, **11**, (1946), 27-34, 1947.

KUBIENA. — The soils of Europe. Th. Murby and Cy, London, 317 p. 1953.

KURMIES (B.). — Humusbestimmung nach dem Bichromatverfahren ohne Kaliumjodid. *Zeitschrft. Pfl. Düng. Bodenk.*, **44**, 121-125, 1949.

LAATSCH (W.). — Entwicklungstendenze und system der deutschen Acker und Waldböden. *Kolloïd. Beih.*, **46**, 143-228, 1937.

LAATSCH (W.). — Dynamik der Deutschen Acker-und Waldböden. Theod. Steinkopff, Dresden und Leipzig, 1938.

LAFOND (A.). — Oxidation-reduction potential as a characteristic of forest humus types. *S. S. S. A. P.*, **14**, (1949), 337-340, 1950.

LARSEN-(J. E.), WARREN (G. F.) et LONGSTON (R.). — Studies of phosphorus availability in organic soils. *S. S. S. A. P.*, **22**, (1957), 336-339, 1958.

LARSON (W. E.). — Response of sugarbeets to potassium fertilization in relation to soil physical and moisture conditions. *S. S. S. A. P.*, **18**, (1953), 31-3317, 1954.

LAWTON (K.). — The influence of soil aeration on the growth and absorption of water by corn plants. *S. S. S. A. P.*, **10**, (1945), 263-268, 1946.

LEYTON (L.). — Mineral nutrient relationships of forest trees. *For. Abstr.*, **9**, 399-408, 1948.

LEYTON (L.) et ARMSON (K. A.). — -Mineral composition of the foliage in relation to the growth of Scots Pine. *Forest Sci.*, **1**, 210-218, 1955.

LEYTON (L.). — The relationship between the growth and mineral composition of the foliage of Japanese Larch (Larix leptolepis Murr), *Plant and Soil.*, **7**, 167-177, 1956.

LOSSAINT. — Étude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. *Ann. Agronom.*, **10**, 369-414, 493-542 1959.

MACKENZIE (.R C.). — Density of water sorbed on montmorillonite, *Nature*, 181, 334, 1958.

MELSTED (S. W.) et BRAY (R. H.). — Base exchange équilibriums in soils and other exchange materials. *Soil Sci.*, **63**, 209-225, 1947.

MORTLAND (M. M.). — Specific surface and its relationship to some physical and chemical properties of soil. *Soil Sci.*, **78**, 343-347, 1954.

MÜCKENHAUSEN (E.). — Der Wasserhaushalt der Pseudogleye und dessen Bedeutung für die Pflanzen. Congr. Internatl., *Science du Sol*, Hamburg, 24-31 Août, 105-111, 1958.

NEU BAUER (E.). — Versuche nach der Keimpflanzenmethode über der Un-

terschied der Aufnehmbarheit anorganischer-und organischer phosphatformen. *Landw. Versuchstat.* **114**, 225-294, 1933.

PAGE (J. B.) et BODMAN (G. B.). — The effect of soil physical properties on nutrient availability : voir Emil Truog, Mineral Nutrition of Plants, Chapter VI, Madison, 1951.

PEPKOWITZ (L. P.) et SHIVE (J. W.). — The importance of oxygen in the nutrient substate for plant-ion absorption. *Soil Sci.* **57**, 143-154, 1944.

PÉCROT (A.) et AVRIL (P.). — Les sols Ardennais. II. Etude morphologique et génétique des sols hydromorphes associés aux sols bruns acides et aux sols podzoliques du Plateau de Saint-Hubert. *Bull. Instit. Agronom. et des Stat. d. Recherch. de Gembloux,* **26**, 151-169, 1958.

PLAISANCE (G.). — Les sols à simili-gley. Bull. A. F. E. S., fév. nº 73, 392-416, 1956.

PIERRE (W. H.). — The phosphorus cycle and soil fertility. *Journ. Amer. Soc. Agron.,* **40**, 1-14, 1948.

PICCI (G.). — Die Mineralisation von organischen Phosphor durch Microben-referated en Chem. *Zentralbl.,* 1954, vol 125, nº 5157-1954.

PURI (A. N.) et KEEN (B. A.). — The dispersion of soil in water under various conditions. *J. Agr. Sci.,* **15**, 147-161, 1925.

QUISPEL (A.). — Measurement of the oxidation-reduction potentials of normal and inundated soils. *Soil Sci.,* **63**, 265-275, 1947.

REDLICH (G. C.) et HUDIG (J.). — Over de indrogende Veengronden. Tijdschrift Nederl. *Heide My.,* **53**, 212-, 279-289, 1941.

RESPONDEK (V.). — Die Wasserverdichtung an Bodenkolloiden und deren Veränderung durch hydrophile und hydrophobe Hüllen. *Zeitschrft. Pfl. Düng. Bodenk.,* **81**, 242-256, 1958.

RICH (C. I.). — Aluminium in interlayers of vermiculite. *S. S. S. A. P.,* **24**, (1959), 26-32, 1960.

RICHARDS (L. A.), et FIREMAN (M.). — Pressure plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. *Soil Sci.,* **56**, 395-404, 1943.

RICHARDS (L. A.) et MOORE (D. C.). — Influence of capillary conductivity and depth of wetting on moisture retention in soil. *Trans. Amer. Geophys. Union.,* **33**, 531-540, 1952.

RID (H.). — Die Stellung der pseudovergleyten Böden im Acker-und Pflanzenbau. *Congr. Internatl. Science du Sol,* Hamburg, 24-31 août, 99-111, 1958.

ROMANOFF (M.). — Effect of aeration on hydrogen-ion concentration of soils in relation to identification of corrosive soils. *Natl. Bur stand. U. S. Departm. Commerce. Res. Paper,* 1639, 1945.

RUSSELL (M. B.). — Soil aeration and plant growth in B. T. Shaw : Soil physical conditions and plant growth. Chapter IV, New-York, 1952.

SCHATZ (A. C. N.), SCHATZ (V.) et TRELAWNY (G. S.). — Chelation (Sequestration) as biological weathering factor in pedogenesis. *Proc. Penn. Acad. Sci.,* **28**, 44-51, 1954.

SCHOFIELD (R. K.). — The pF of the water in soil. Trans. 3rd Int. Congr. *Soil Sci.,* **2**, 37-48, 1935.

SCHOFIELD (R. K.) et DACOSTA (J. V. B.). — Determination of the pF at permanent wilting and at moisture equivalent by the freezing point method. Trans. 3rd. Internatl. Congr. *Soil Sci.,* **1**, 6-10, 1935.

SCHNEIDER (F.). — Ubergangsbildungen von mineralischen Grundwasserböden zu gleyartigen Böden (Pseudogleyen) in West-Deutschland. Thesis Bonn. 1949.

SCHNITZER (M.) et DE LONG (W. A.). — The nature of leaf extracts and leachates with iron. *S. S. S. A. P.,* **19**, (1954), 363-368, 1955.

SCHNITZER (M.). — Interaction of iron with rainfall leachates. *Journ. of Soil Sci.,* **2**, 300-308, 1959.

SCHROEDER (D.). — Kaliumfestlegung und Kaliumnachlieferung von Löszböden. *Landw. Forsch.*, **8**, 1-7, 1955.

SHAPIRO (R. E.), TAYLOR (G. S.) et VOLK (G. W.). — Soil oxygen contents and ion uptake by corn. *S. S. S. A. P.*, **20**, (1956), 193-197, 1957.

SAWHNEY (B. L.), JACKSON (M. L.) et CAREY (R. B.). — Cation exchange capacity determination of soils as influenced by cation species. *Soil Sci.*, **87**, 243-248, 1959.

TAYLOR (S. A.). — Soil-air-plant relationships with emphasis on means characterizing soil aeration. Ph. D. Dissertation, Cornell University, 1949.

TYULIN (A. Th). — Herkunft, Struktur und Eigenschaften organomineralischer Bodenkolloïde. *Bodenk. und Pfl.*, 21-22, 544-568, 1940.

TSCHAPEK (M. W.). — Die Dichte des durch den Boden adsorbierten Wassers. *Zeitschrft. Pfl. Düng. Bodenk.*, **34**, 265-271, 1934.

TSCHEBOTRAOFF (G. P). — Soil mechanics foundations and earth structures. Mc. Graw-Hill Book Company Inc. New York 655 p. 1951.

ULRICH (B.) et BENZLER (J. H.). — Der organisch gebundene Phosphor im Boden, *Zeitschrft. Pfl. Düng. Bodenk.*, **70**, 220-249, 1955.

VAB DER MAREL (H. W.). — A study on the cation-and anion adsorption of tropical and Dutch soils. Thesis Agricult. Univ. Wageningen. Pays-Bas. 1935.

VAN DER MAREL (H. W.). — Organic phosphorus in soils. Landbouwk. *Tijdschrift*, **47**, 85-88, 1935.

VAN DER MAREL (H. W.). — Omtrent het voorkomen van de mineralen orthiet en zirkoon in de liparietgronden van Sumatra'sO ostkust. *De Mijningenieur*, **7**, 33-38, 1941.

VAN DER MAREL (H. W.). — Tropical soils in relation to plant nutrition. *Soil Sci.*, **64**, 445-451, 1947.

VAN DER MAREL (H. W.). — Volcanic glass, allanite and zircon as characteristic minerals of the Toba rhyolite at Sumatra's East Coast. *Journ. Sedim. Petrol.*, **18**, 24-29, 1948.

VAN DER MAREL, (H. W.). — The amount of exchangeable cations of K-fixating soils. Transact. *5th Internatl. Congr. Soil Sci., Léopoldville*, **2**, 300-307, 1954.

VAN DER MAREL (H. W.). — Potassium fixation in Dutch soils. *Soil Sci.*, **78**, 163-179, 1954.

VAN DER MAREL (H. W.) et VENEKAMP (D. T. N.). — Onderzoek naar het verschynsel van kalifixatie. *Versl. Landbouwk. Onderz.*, **61**, 8, Den Haag. 1955.

VAN DER MAREL (H. W.). — Potassium fixation a beneficial characteristic for crop production. *Zeitschrft. Pfl. Düng. Bodenk.* **84**, 51-62, 1959..

VEIHMEYER (F. J.) et HENDRICKSON (A. H.). — The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Sci.*, **32**, 181-193, 1931.

WALLACE (A.), NORTH (C. P.), MUELLER (R. T.) et ACMAIDAN (N.). — Chelating agents as a means of supplying micronutrients to wooden plants in alkaline and calcareous soils. *Proc. Amer. Soc. Hortic. Sci.*, **62**, 116-118, 1953.

WALSH (T.) et CLARKE (E. J.). — Characteristics of Irish orchard soils in relation to apple tree growth. *Journ. Dept. Agr. Eire*, **40**, 61-122, 1943.

WEINSTEIN (L. H.), ROBBINS (W. R.) et PERKINS (H. F.). — Chelating agents and plant nutrition. *Sci.*, **120**, 41-43, 1954.

WIERSMA (D.) et MORTLAND (M. M.). — Response of sugar beets to peroxide fertilization and its relation to oxygen diffusion. *Soil Sci.*, **75**, 355-360.

546. 18 : 545. 81

OBSERVATIONS SUR LE DOSAGE COLORIMÉTRIQUE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE

PAR

J. COTTE et M. L. GIELFRICH
École nationale d'Agriculture, Rennes.

INTRODUCTION

La méthode céruléomolybdique est certainement la plus employée pour le dosage colorimétrique de l'ion orthophosphorique. On sait que cette méthode consiste dans l'appréciation de la coloration bleue donnée par l'acide phosphorique en présence de molybdate et d'un réducteur. Les très nombreux composés proposés pour réduire le complexe phosphomolybdique — DUVAL (1) — en signale plus de 20 — indiquent suffisamment l'intérêt porté par les chercheurs à cette méthode dont le champ d'application, de ce fait, est particulièrement étendu et varié.

Nous avons comparé entre eux un certain nombre de réducteurs nous paraissant être les plus couramment utilisés, en vue de définir les meilleures conditions pour le dosage de l'acide phosphorique dans les sols et les végétaux, c'est-à-dire dans des échantillons qui contiennent toujours de la silice. Or, l'acide silicique donne aussi la coloration bleue de sorte que le dosage de l'acide phosphorique risque d'être faussé par excès [1]. Bien que les végétaux contiennent toujours de la silice, en quantités au demeurant fort variables (les pailles de graminées en contiennent suffisamment pour amener le rapport SiO_2/P_2O_5 à la valeur 15 à 20 (2)) la quasi-totalité ou la totalité de celle-ci se trouve éliminée au cours de la minéralisation de l'échantillon que l'on opère par la méthode des cendres ou par la méthode perchlorique ; de sorte que l'on n'a guère à se soucier de l'incidence de la silice sur le dosage de l'acide phosphorique. Par contre, dans les solutions naturelles de sol et les extraits (nitrique, citrique, oxalique) destinés au dosage de l'acide phosphorique (P_2O_5 assimilable) la présence constante de silice (3-4) oblige l'utilisation d'une méthode sélective pour le dosage de l'acide phosphorique.

Enfin, nous avons étudié, dans les extraits de sol, l'influence des matières organiques passées en solution à la faveur du contact terre-solution.

[1] L'acide arsénique donne également la réaction. Toutefois les très faibles quantités d'arsenic normalement présentes dans les végétaux ou les sols permettent de négliger complètement l'influence de cet oligo-élément sur le dosage de l'acide phosphorique.

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

1. — Appareil

Les mesures ont été effectuées sur le photocolorimètre Jean et Constant de Prolabo, utilisé avec les cuves de 1, 2 ou 5 cm d'épaisseur de façon à travailler avec des densités optiques au plus égales à l'unité. Sauf indication contraire, les quantités de P_2O_5 dont il est fait mention dans les modes opératoires décrits sont celles qui conviennent pour l'utilisation d'une cuve photométrique de 1 cm d'épaisseur.

2. — Longueur d'onde.

En pratiquant la méthode sans chauffage, nous avons trouvé un maximum d'absorption à 730 mμ ; la sensibilité restant très bonne dans l'intervalle 720-750 mμ ; et ce maximum est indépendant du réducteur employé. Par contre, ainsi que l'ont fait remarquer Burton et Riley (5) puis Delsal et Mahnouri (6), la longueur d'onde du maximum d'absorption varie avec l'acidité de la solution : une augmentation du pH déplace le maximum vers une plus grande longueur d'onde. Cette particularité explique sans doute la diversité relative des chiffres indiqués par différents expérimentateurs.

Dans les dosages pratiqués à chaud, c'est-à-dire après un séjour plus ou moins prolongé au bain-marie bouillant, le maximum d'absorption est à 800 mμ. Il faut noter aussi que la coloration obtenue à froid évolue lentement : son intensité augmente et, de plus, la longueur d'onde du maximum se déplace jusqu'à atteindre 800 mμ au bout de 24 heures.

3. — Développement de la coloration.

La réaction céruléomolybdique peut être utilisée de différentes façons :

— à froid, c'est-à-dire à la température du laboratoire. La méthode est alors très simple mais très généralement la coloration bleue n'est pas stable et les déterminations photométriques doivent être faites à temps constant ;

— à chaud, c'est-à-dire après un séjour au bain-marie bouillant et mesure après refroidissement à température ambiante. La sensibilité de la méthode est à peu près multipliée par 5 et la coloration obtenue est très stable. On peut encore améliorer la sensibilité en concentrant la coloration bleue dans le minimum de *n* butanol ou d'isobutanol. Nous n'avons pas envisagé cette méthode, la sensibilité obtenue à chaud, sans extraction de la coloration étant très largement suffisante dans les analyses agricoles.

MÉTHODES SANS CHAUFFAGE

Les phénols ou polyphénols utilisés pour la réduction de l'acide phosphomolybdique s'emploient le plus souvent en présence de sulfite ce qui confère l'avantage d'avoir des essais à blanc à peu près incolores.

Nous référant à des travaux antérieurs, nous avons essayé trois composés :

— l'hydroquinone (7-8) ;

— le sulfate de N méthyl para-amino-phénol (métol-génol-rhodol) (5-6) ;
— l'acide 1-2-4 aminonaphtol sulfonique (A. N. S) (9).

Les quantités des divers réactifs s'établissent comme suit :

P_2O_5 maximum	600 γ
SO_4H_2 10 N	5 ml
Solution réductrice mixte	5 ml
Molybdate d'NH_4 à 5 p. 100	5 ml
Eau q. s.	50 ml

Les solutions réductrices ont la composition suivante :

1. —	Sulfite de sodium cristallisé (SO_3Na_2, 7 H_2O)	20 g
	Hydroquinone	0,5 g
	Eau q. s.	100 ml
2. —	Sulfite de sodium cristallisé	20 g
	Métol	0,5 g
	Eau q. s.	100 ml
3. —	Métabisulfite de potassium	6 g
	Sulfite de sodium cristallisé	1,2 g
	A. N. S.	0,1 g
	Eau q. s.	100 ml

Pour l'hydroquinone et le métol, les produits du commerce conviennent parfaitement ; par contre, il est nécessaire de purifier l'A. N. S. (10). Les quantités des divers réactifs dont il est fait mention ci-dessus ont été choisies en fonction de divers impératifs dont celui de la silice. Elles sont généralement différentes de celles que nous avons relevées dans des travaux antérieurs, sauf pour l'A. N. S. : ici nous avons simplement appliqué les conditions opératoires des auteurs de cette excellente méthode.

Après l'addition des divers réactifs, on observe un temps de repos *t* avant la mesure photométrique.

L'hydroquinone et le métol confèrent à la réaction une sensibilité à peu près égale ; l'A. N. S. se place un peu au-dessus. Ces trois réducteurs se différencient plus encore par la cinétique de la réaction à laquelle chacun d'eux participe : l'hydroquinone agit lentement, l'A. N. S. est le plus rapide, le métol est intermédiaire (Tableau I).

TABLEAU I

P_2O_5 : 100 γ *dans* 10 *ml. — Densité optique sous* 1 *cm d'épaisseur.*

Temps (minutes)	Densités optiques x 100		
	Hydroquinone	Métol	A N S
5	55	61,5	67,5
10	61	65	69
15	62,7	66	69,5
20	64	66,7	70
30	65,5	67,4	71
45	67,2	68	72
60	68	68,5	72,6

L'intensité de la coloration est fonction du temps. Les mesures sont effectuées à partir du moment où cette variation est devenue suffisamment faible pour que l'erreur sur la mesure du temps n'apporte pas de dispersion des résultats. Nous avons retenu un temps de repos de :

— 15 minutes pour l'A. N. S.
— 30 minutes pour le métol.
— 45 minutes pour l'hydroquinone.

Influence de la silice.

L'acide silicique donne également la coloration bleue. Il est cependant nécessaire que la solution soit moins acide que pour le dosage de l'acide phosphorique (11-12). Un milieu plus acide, (pH < 1,5) polymérise la silice et l'inactive, au moins partiellement (1).

Avec les proportions des divers réactifs précédemment indiquées, il est possible de doser correctement l'acide phosphorique en présence des quantités importantes de silice. La prise d'essai ($P_2O_5 + SiO_2$) est additionnée des divers réactifs dans l'ordre suivant :

SO_4H_2 10N	5 ml
Solution réductrice mixte	5 ml
Molybdate NH_4 à 5 %	5 ml

Le liquide est homogénéisé après chaque addition de réactif puis, tout en agitant, on complète au trait de jauge (50 ml) par addition d'eau distillée. Enfin, on homogénéise par retournement et on fait partir le chronomètre. Il nous paraît essentiel, au cours de ces diverses phases, d'éviter la formation de zones de liquide de faible acidité au sein desquelles la silice trouve des conditions favorables pour donner la coloration bleue.

Le tableau II indique les résultats obtenus :

TABLEAU II

γ dans 50 ml		Densités optiques x 100		
P_2O_5	SiO_2	A N S	Métol	Hydroquinone
500	5 000 (1)	67,6 67,0 67,0	64,0 64,6 64,0	63,2 63,8 63,6
500	0 (1)	67,2 66,6 66,8	64,0 63,8 63,8	63,4 62,8 63,0
100	5 000 (2)	71,0 70,7 72,0	67,5 68,0 69,0	66,1 65,6 66,0
100	0 (2)	70,9 70,3 70,5	67,4 67,6 67,0	66,2 65,6 66,5

(1) Densités optiques sous 1 cm d'épaisseur.
(2) Densités optiques sous 5 cm d'épaisseur.

On voit que, même pour un rapport $SiO_2/P_2O_5 = 50$, le résultat, généralement par excès, reste toujours dans les limites qui permettent une très bonne approximation.

MÉTHODES AVEC CHAUFFAGE

Outre les 3 réducteurs précédemment cités, nous avons essayé l'hydrazine, recommandée par BEVERIDGE et JOHNSON (13) puis CROWTHER (14). Contrairement aux phénols, l'hydrazine réduit à chaud seulement l'acide phosphomolybdique.

Pour éviter d'avoir des essais à blanc colorés, il est nécessaire de modifier assez profondément les quantités de réactifs utilisés dans les dosages à froid :

— Augmentation de l'acidité ;

— Réduction de la quantité de molybdate et de réducteur.

Les quantités de réactifs sont donc les suivantes :

P_2O_5 maximum	120 γ
SO_4H_2 10 N	7,5 ml
Solution réductrice mixte	2,5 ml (voir avant)
ou Sulfate d'hydrazine à 0,15 p. 100	2 ml
Molybdate d'NH_4 à 5 p. 100	2,5 ml

La solution phosphorique, additionnée des divers réactifs dans l'ordre ci-dessus et avec les précautions précédemment indiquées, puis complétée à 50 ml et homogénéisée, est placée au bain-marie bouillant. Après le temps de chauffage *t*, la solution est refroidie 5' sous l'eau courante puis laissée 15' environ à température ambiante avant d'être mesurée au photocolorimètre ; à cette température la solution n'évolue pas et la densité optique est parfaitement stable.

Comme dans les dosages sans chauffage, la vitesse de formation du composé bleu est très différente suivant le réducteur employé. Tableau III.

TABLEAU III

P_2O_5 = 100γ dans 50 ml.

Temps (minutes)	Densités optiques x 100			
	A N S	Métol	Hydroquinone	Hydrazine
5	66			72
10	71	37	27,5	72
15	72	53,8		71,6
20	71,5	58,1	39	72
30	72	62,3	56,8	72
45	72,5	64,2	59,3	
60	72	64,5	61,5	
75		64,8	62	
90		66	64	

Le maximum est atteint rapidement (15') avec l'A. N. S., plus rapidement encore (5') avec l'hydrazine ; puis dans les deux cas, la coloration est stable (indépendante du temps de chauffage). Il faut 45' pour atteindre un palier avec le métol (montée très lente entre 45' et 75') et 1 heure pour trouver un phénomène identique mais moins marqué avec l'hydroquinone (entre 60 et 75') ; on voit que ces deux derniers composés sont loin de réunir les qualités des deux premiers, tant du point de vue rapidité que du point de vue sensibilité. L'hydrazine présente quelques avantages sur l'A. N. S. D'abord, la solution aqueuse de ses sels (ici, le sulfate) est d'une très bonne conservation ; de plus, l'hydrazine s'emploie seule, c'est-à-dire sans addition de sulfite : pas

de dégagement de SO_2 au cours du passage au bain-marie ; enfin la coloration bleue monte très vite. En revanche l'A. N. S. peut être utilisé avec ou sans chauffage, fournissant ainsi la possibilité de travailler dans une zone de sensibilité plus étendue.

Influence de la silice.

Les réducteurs essayés se comportent de manière fort différente. C'est ce qui ressort du tableau IV. Le temps de chauffage *t* a été de :

1 heure pour l'hydroquinone ;
45' pour le métol ;
20' pour l'A. N. S ;
10' pour l'hydrazine.

TABLEAU IV

γ dans 50 ml		Densités optiques x 100			
P_2O_5	SiO_2	Hydrazine	A N S	Métol	Hydroquinone
100	0	73,5	74,5	66	64,5
100	5 000	74	74,6	73,3	69,2
100	2 500	73,5	75	71,2	67,5
100	1 000	73,5	74,5	68,2	74,0
100	500	73	74,5	67,4	66,5

Avec l'hydrazine et l'A. N. S. les résultats sont bons même dans le cas d'un rapport $SiO_2/P_2O_5 = 50$. Il n'en est pas de même avec l'hydroquinone et plus encore avec le métol. La nécessité dans laquelle on se trouve lors de l'emploi de ces réducteurs, de poursuivre plus longtemps le séjour au bain-marie bouillant fait que la silice donne une surcharge telle que le dosage de l'acide phosphorique devient impossible.

MÉTHODE AU CHLORURE STANNEUX

La méthode céruléomolybdique de DENIGES au chlorure stanneux a été utilisée à diverses reprises, en particulier par TRUOG (15) et ZINDZADZÉ (16) dans le domaine agronomique.

L'emploi du chlorure stanneux confère à la réaction une sensibilité meilleure que celle donnée par les réducteurs organiques utilisés à chaud, l'avantage étant plus marqué pour la méthode ZINDZADZÉ. Mais il faut sans doute reprocher à ce réducteur la non stabilité de sa solution qui oblige à établir les témoins pour chaque série de dosages.

Les volumes des divers réactifs sont les suivants :

	Méthode Truog	*Méthode Zindzadzé*
P_2O_5	100-120	100-120
SO_4H_2 10 N	2 ml	0,8 ml
Molybdate NH_4 5 p. 100..	1 ml	0,4 ml
Cl_2Sn 0,5 p. 100.........	0,75 ml	1,25 ml

Nous avons suivi le mode opératoire des auteurs : la solution phosphorique, amenée au volume de 40 ml environ, est additionnée de l'acide sulfurique puis du molybdate. Compléter alors à 50 ml et homogénéiser. Ajouter la solution de chlorure stanneux et homogénéiser à nouveau. La coloration

bleue est presque immédiate. La stabilité n'est pas parfaite mais, dans chaque méthode on trouve un palier se situant (Voit tableau V) :

TABLEAU V

P_2O_5 : 100 γ *dans* 50 *ml.*

Minutes	Densités optiques x 100	
	Zindzadzé	Truog
3	89,6	77,6
5	88,0	77,9
7	87,4	78,0
10	87,0	78,0
13	86,6	77,7
15	86,6	76,2
20	86,6	75,9
25	86,4	75,5
30	85,7	75,3

— entre 13 et 20 minutes pour la méthode ZINDZADZÉ ;
— entre 5 et 10 minutes pour la méthode TRUOG,

Nous avons adopté les temps de repos de 15 minutes pour la méthode ZINDZADÉ et de 7 minutes pour la méthode TRUOG.

L'incidence de la silice est plus faible dans la méthode TRUOG que dans la méthode ZINDZADZÉ. Cette dernière n'est pas utilisable dans les conditions sévères $\left(\frac{SiO_2}{P_2O_5} = 25\right)$ où la méthode TRUOG fournit encore des résultats très acceptables. (Tableau VI).

TABLEAU VI

en γ dans 50 ml		Densités optiques x 100	
P_2O_5	SiO_2	Zindzadzé	Truog
100	0	85,3	78,2
100	2 500	91,1	79,1
100	1 000	87,3	78,8
100	500	88,0	78,0
100	250	85,7	78,0

DOSAGE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE DANS LES EXTRAITS CITRIQUES

Les acides-alcools gênent la réduction de l'acide phosphomolybdique. PYANKOV et MARGOLIS (17) ont mis à profit cette propriété pour bloquer, au moyen d'acide tartrique, la coloration bleue due aux phosphates et doser sélectivement les silicates.

L'extraction de la fraction dite assimilable de l'acide phosphorique du sol se fait, en France, et pour les terres non calcaires, par l'acide citrique (méthode Dyer). Afin de nous rendre compte si le dosage colorimétrique de P_2O_5 peut s'effectuer directement sur l'extrait citrique, nous avons suivi l'importance de l'effet dépressif de l'acide citrique en fonction de sa concentration et déterminé le seuil en deçà duquel le dosage n'est plus perturbé :

1. — dans les méthodes sans chauffage, les divers réducteurs essayés sont très sensibles à l'acide citrique qui, même à teneur très faible, diminue très fortement l'intensité de la coloration bleue.

2. — dans les méthodes avec chauffage, les résultats sont plus favorables. L'A. N. S. et l'hydrazine agissant 20 minutes à 100°, autorisent une concentration maximum en acide citrique de 0,25 p. 100. L'extrait de sol Dyer étant à 2 p. 100 d'acide citrique, la prise d'essai à ne pas dépasser est de 6 ml pour un volume final de 50 ml ; très souvent du reste, une prise d'essai plus faible sera mieux appropriée.

Nous avons essayé ces conditions sur un lot de terres non calcaires, de diverses provenances et fort différentes quant à la teneur en P_2O_5. Sur l'extrait citrique de chacune d'elles nous avons fait deux dosages d'acide phosphorique :

a) directement sur cet extrait ;

b) après une oxydation permanganique de l'extrait selon ZINDZADZÉ. (16). La prise d'essai (0,5 à 6 ml) placée dans un ballon jaugé de 50 ml est additionnée de 2,5 ml SO_4H_2 10 N. Amener à ébullition et ajouter lentement une solution N de MnO_4K jusqu'à ce que la coloration violette persiste plusieurs minutes. Ajouter alors H_2O_2 (H_2O_2 Electro de Prolabo) à 1 ou 2 volumes, goutte à goutte, pour décolorer. Diluer à 20 ml environ et laisser bouilllir 5 à 10' pour détruire le très léger excès de H_2O_2. A ce moment, il suffit d'ajouter le complément d'acide, soit 5 ml de SO_5H_2 10 N, puis dans l'ordre, les réactifs précédemment indiqués. Les résultats sont réunis dans le tableau VII.

TABLEAU VII

Terre N°	Prise d'essai en ml d'extrait citrique	P_2O_5 en mg pour 100 ml d'extrait citrique		Ecart % (a—b)
		dosage direct (a)	dosage après oxydation par MnO_4K (b)	
I......	2	5,32	5,37	— 0,95
II......	5	0,64	0,68	— 6
III......	6	0,87	0,95	— 8,5
IV......	6	2,28	2,26	+ 0,9
V......	2	5,24	5,65	— 7,25
VI......	2	5,09	5,10	— 0,2
VII......	3	4,44	4,72	— 5,9
VIII......	0,5	19,20	19,20	0
IX......	3	3,76	4,61	— 18,5
X......	4	2,51	2,86	— 12,2
XI......	1	7,87	8,10	— 2,8
XII......	2	4,21	4,61	— 8,7

Les chiffres donnés par le dosage direct sur l'extrait citrique sont quelquefois égaux, le plus souvent inférieurs à ceux obtenus sur l'extrait préalablement oxydé par MnO_4K. Le déficit observé est, en accord avec les données précédemment établies, indépendant de la teneur en acide citrique de la solution sur laquelle se fait le dosage : la comparaison entre les terres III et IV d'une part, VI et XII d'autre part est, à cet égard, particulièrement significative. Il est le fait des matières organiques colorant l'extrait citrique en jaune ou en brun qui sont passées en solution à la faveur du contact prolongé entre la terre et la réactif d'extraction.

Toute méthode se proposant d'effectuer le dosage de P_2O_5 directement

sur l'extrait citrique, sans simplification préalable du milieu (18-19) nous paraît peu sûre. On peut, à priori, considérer les résultats comme entachés d'une erreur par défaut dont il est difficile de chiffrer la grandeur.

CONCLUSION

Les méthodes céruléomolybdiques sans chauffage conviennent pour doser des quantités d'acide phosphorique comprises entre 10 et 100 γ de P_2O_5 sous un volume de 10 ml (1). Les trois réducteurs organiques essayés : A. N. S., métol et hydroquinone sont sensiblement équivalents et permettent, avec une acidité suffisante et un mode opératoire défini, le dosage de P_2O_5 en présence de quantités importantes de silice : $\frac{SiO_2}{P_2O_5} = 50$. L'A. N. S. mérite d'être signalé par la grande rapidité qu'il imprime à la réaction. Toutes ces méthodes demandent une mesure de la densité optique à temps constant car la coloration bleue n'est pas stable.

Les méthodes céruléomolybdiques avec chauffage permettent de doser 1 à 2 γ sous un volume de 10 ml ([1]) ; dans ce cas, l'A. N. S. et l'hydrazine surclassent très nettement le métol et l'hydroquinone ; d'une part, leur action est infiniment plus rapide et la coloration bleue obtenue est parfaitement stable ; d'autre part, ils permettent un dosage sélectif d'acide phosphorique en présence de silice jusqu'au rapport $\frac{SiO_2}{P_2O_5} = 50$, ce qui n'est pas le cas pour le métol et l'hydroquinone dont les résultats fournis sont aberrants même dans les conditions beaucoup moins sévères.

Les méthodes au chlorure stanneux de ZINDZADZÉ et TRUOG sont d'une sensibilité un peu supérieure à celles des méthodes précédentes (méthodes avec chauffage). La mesure de la densité optique doit être effectuée à temps constant et il est indispensable d'établir les témoins pour chaque série de dosages ce qui nous paraît être un inconvénient certain. La silice marque beaucoup plus rapidement avec la méthode ZINDZADZÉ qu'avec la méthode TRUOG.

Dans toutes les méthodes, la loi Beer-Lambert est suivie, dans le domaine des concentrations indiquées et les courbes de comparaison sont valables dans le temps (sauf pour Cl_2Sn) pourvu que les conditions opératoires restent inchangées.

Le dosage colorimétrique de P_2O_5 dans les extraits citriques de sols n'est pas recommandable. Bien que deux réducteurs organiques, l'A. N. S. et l'hydrazine, permettent le dosage de P_2O_5 en présence d'acide citrique à la concentration maximum de 0,25 p. 100, les résultats fournis sont souvent entachés d'une erreur par défaut, imprévisible. La cause de ce déficit est imputable à la matière organique, toujours présente, mais en quantité variable, dans l'extrait citrique.

SUMMARY

Observations on the colorimetric determination of phosphorus.

The different reducing agents used in the colorimetric determination of the orthophosphate ion by the mobybdenum-blue method are compared.

For the mobybdenum-blue technique without heating, the three reducing agents tried were : 1-2-4 amino-naphtol-sulphonic acid (A. N. S.), N-methyl para-amino-phenol (methol) and hydroquinone.

([1]) Sensibilité permise par la mesure de la densité optique sous 1 cm d'épaisseur.

For the mobybdenum-blue technique with heating, hydrazine was also tried as a fourth reducing agent.

The effect of silica on the determination of phosphorus by the various methods tried was investigated, and the estimation of phosphorus in citric-acid extracts of soil is described.

ZUSAMMENFASSUNG

Beobachtungen zur kolorimetrischen Bestimmung von Phosphorsäure.

Die Autoren vergleichen verschiedene Reduktionsmittel welche bei der kolorimetrischen Bestimmung von Orthophosphorsäure unter Benützung der Cöruleomolybdat-Methode, zur Anwendung gelangen.

Für die Methoden welche keiner Erwärmung bedürfen, wurden drei organische Reduktionsmittel erprobt : 1-, 2-, 4-Aminonaphtol-sulfosäure (A. N. S.), das Sulfat des p-N-Methylaminophenols (Metol) und Hydrochinon. Für solche Methoden die eine Erwärmung benötigen, wurde ein viertes Reduktionsmittel, in Form von Hydrazin hinzugezogen.

Die Methoden nach Zindzadze nnd Truog welche Stannochlorid benützen wurden ebenfalls erprobt.

Die Autoren untersuchten den Einfluss von Kieselsäure auf die Bestimmung des Phosphorsäure-Ions für die verschiedenen, beschriebenen Methoden ; ferner untersuchten sie die Bestimmung der Phosphorsäure in zitrathaltigen Bodenextrakten.

Références Bibliographiques

(1) Duval (C.). — Traité de microanalyse minérale, tome IV ; 224 et 435 Éditeur : Presses scientifiques internationales à Paris, 1957.
(2) Coppenet (M.), Ducet (G.), Guerillot (J.) et Kahane (E.). — *Ann. Agro.*, **4,** 564, 1947.
(3) Demolon (A.). — Dynamique du sol ; 5e édition ; 324. Dunod à Paris, 1952.
(4) Gachon (L.). — *Ann. Agro.*, **6,** 809, 1953.
(5) Burton (J. D.) et Riley (J. P.). — *Microchimica acta.*, **9,** 1350, 1956.
(6) Delsal (J. L.) et Manhouri (H.). — *Bull. Soc. Chim. bio.*, **40,** 1623, 1958.
(7) Briggs (A. P.). — *J. Biol. Chem.*, **53,** 13, 1922.
(8) Macheboeuf (M.) et Delsal (J. L.). — *Bull. Soc., Chim. bio.*, **25,** 116, 1943.
(9) Fiske (C. H.) et Subbarow (Y.). — *J. Biol. Chem.*, **66,** 375, 1925.
(10) Brunel (A.). — Traité pratique de Chimie végétale, tome II ; 406. Éditeur : Georges Frère à Tourcoing, 1948.
(11) Charlot (G.). et Gauguin (R.). — Dosages colorimétriques ; 214. Éditeur : Masson à Paris, 1952.
(12) Jean (M.). — *Chimie analytique.*, **38,** 37, 1956.
(13) Beveridge (J. M. R.) et Johnson (S. E.). — *Can. J. Res.*, **27** E, 159, 1949.
(14) Crowther (J.). — *Anal. chem.*, **26,** 1383, 1954.
(15) Truog (E.). — *J. amer. Soc. Agron.*, **22,** 874, 1930.
(16) Zindzadzé (C.). — *Ann. Agro.*, **3,** 321, 1931.
(17) Pyankov (V. A.) et Margolis (E. G.). — *Biochimia.*, **17,** 39, 1952.
(18) Dupuis (Mme). — *Ann. Agro.*, **6,** 811, 1953.
(19) Bouvattier (G.). — *Ann. Agro.*, **2,** 221, 1960.

BIBLIOGRAPHIE

63 : 38

ALLEN (G. R.). — **Agricultural marketing policies.** Oxford, Blackwell, 336 p., 1959.

L'auteur a voulu, tout en présentant les résultats de ses recherches personnelles, faire une analyse générale des aspects économiques du « marketing » agricole. Après une brève discussion sur les problèmes de la répartition des revenus en agriculture, ainsi qu'entre le secteur agricole et les autres secteurs économiques, il décrit et évalue les critères économiques généraux qui entrent en jeu dans l'estimation et la comparaison des différentes politiques possibles de « marketing » ; il étudie en particulier celles-ci en relation avec leurs effets sur les deux points suivants : les fluctuations économiques de la production et des revenus agricoles, le coût de la commercialisation des produits agricoles.

Des chapitres sont consacrés à la commercialisation des œufs, des fruits et légumes, de la viande, du lait et de la laine en Angleterre, mais de nombreux exemples sont empruntés à d'autres régions du monde, et permettent de comparer l'expérience des différents pays en ce domaine.

581. 9

BLAIS (R.). — **Flore pratique.** Paris, Presses Universitaires de France, 1959.

La présentation agréable de cet ouvrage en fait un livre non pas scolaire ou sévèrement scientifique, mais un compagnon de promenade.

En plus des chapitres classiques que l'on rencontre dans une flore, figurent également des indications générales de Biologie et de Géographie botanique où les plantes sont présentées comme organismes vivants et non pas seulement comme pièces d'herbier.

Le mode de détermination utilisé dans les clés permet de prendre contact avec la systématique de façon progressive, rationnelle, aisée, sans disposer, au départ, d'une quantité trop importante de connaissances en cette matière. L'identification d'une espèce n'est plus un travail d'érudit, décourageant pour un profane, mais une agréable diversion, d'autant plus que les illustrations sont suffisamment détaillées, ont une dimension telle que l'on n'est pas obligé d'avoir recours une nouvelle fois à la loupe pour les observer et les comparer au modèle.

J. R.

634. 9 : 631. 8

BRUNING (D.). — **Forstdüngung.** Leipzig, Neumann Verlag, 210 p., 1959.

Cette ouvrage est destiné à montrer l'intérêt de la fertilisation en sylviculture. Il rapporte diverses expériences sur ce sujet, en insistant particu-

lièrement sur l'effet utile de la potasse et de la magnésie, notamment sur *Pinus sylvestris, Robinia pseudacacia* et *Quercus borealis.* Diverses méthodes de diagnostic d'insuffisance de nutrition minérale sont étudiées (symptômes visibles, analyses de feuilles ou de sols, essais en pots, etc...). Nombreuses planches en couleurs.

S. T.

582. 5/6

CRETÉ (P.). — **Précis de botanique : II. Systématique des Angiospermes.** Paris, Masson, 429 p., 1959.

L'ouvrage s'adresse surtout à des pharmaciens, mais l'auteur a eu le souci de donner une vue d'ensemble du vaste groupe des Angiospermes du monde entier. C'est pour cela que de nombreuses familles exotiques, ainsi que des familles ne présentant pas, pour le moment, d'intérêt en thérapeutique ont aussi été abordées. Parmi les diverses classifications existantes, l'auteur a tenu à se référer à celle de L. GRIGNARD, en ajoutant d'intéressantes considérations de phylogénie dont une partie est puisée dans les études d'embryologie.

Ce n'est pas un ouvrage de type exhaustif, ce qui a permis à l'auteur de constituer un manuel particulièrement clair, bien illustré et de dimensions réduites. On peut regretter que les tableaux synoptiques n'aient pas été davantage développés, mais cette lacune est compensée par une description, en tête de chaque groupe, des caractères distinctifs indispensables à la bonne compréhension de la classification.

F. P et M. S.

631. 4 (02)

DEMOLON (A.). — **Principes d'agronomie : T. I. Dynamique du sol.** 5° ed., nouv. tirage. Paris, Dunod, 546 p., 1960.

L'agronomie, dont la spécialisation est de plus en plus poussée, exige cependant des connaissances générales qui permettent d'envisager les problèmes de façon non fragmentaire, d'interpréter correctement les faits d'observation, de substituer la science à l'empirisme chaque fois qu'il est possible. De là l'utilité d'ouvrages de synthèse tels ces « Principes d'Agronomie ».

Dans cette édition, l'auteur étudie dans une première partie les transformations des roches ignées ou métamorphiques qui préludent à la formation des sols, expose les problèmes de la pédogénèse et les lois générales de l'évolution des sols et leurs conséquences. Les trois autres parties du livre sont ensuite consacrées successivement à l'examen des milieux physique, chimique et biologique du sol, c'est-à-dire : sa structure et les divers facteurs physiques qui peuvent influer sur ses propriétés, l'ensemble des réactions chimiques qui caractérisent son métabolisme et l'influence des divers organismes vivants. Ainsi sont précisées la signification et la valeur des données qui permettent de caractériser un sol en lui-même, en vue d'adapter les cultures au milieu et de perfectionner les techniques culturales, compte tenu des possibilités du machinisme en matière de travail du sol.

Les agronomes, les forestiers, les ingénieurs agricoles qui, à des titres divers, ont à prendre en considération la connaissance du sol en place, seront intéressés par cette étude des forces qui interviennent dans sa dynamique.

631. 4

DUCHAUFOUR (P.). — **Précis de Pédologie.** Paris, Masson, 438 p., 1960.

La pédologie a provoqué une véritable révolution dans l'ancienne « science du sol » : le sol n'est plus considéré comme un milieu inerte et stable, mais comme un milieu biologique, « dynamique », évoluant aux dépens de l'affleurement géologique, sous l'action du climat et de la végétation ; d'autre part, il est fréquent que les sols aient subi plusieurs évolutions successives, au cours des temps géologiques, sous des climats et des végétations différents : il n'est donc pas étonnant que la pédologie soit une science extrêmement complexe et qu'il ait fallu attendre la deuxième moitié du XX^e^ siècle, pour qu'elle sorte de la confusion d'idées et de vocabulaire qui caractérise toute science nouvelle ; il semble qu'elle ait fait, au cours des dix dernières années, un progrès décisif, de sorte qu'une synthèse cohérente paraît maintenant possible.

L'auteur s'est efforcé de rédiger cet ouvrage sous la forme d'un « précis », à la portée de tous, pouvant intéresser aussi bien les étudiants et les praticiens que les chercheurs et les professeurs. L'illustration a été particulièrement soignée : les différents « profils pédologiques » sont représentés à l'aide de schémas, à caractère synthétique, donnant une idée à la fois de l'aspect des différents niveaux ou « horizons » et de leur composition physico-chimique : la confrontation de ces schémas, avec les photographies en couleur (groupées en deux planches) de 14 types de sols de tous climats (boréal, tempéré, tropical), est particulièrement éloquente. En outre, 14 planches en noir montrent tantôt les détails de structure, tantôt l'aspect des conditions de milieu. qui ont présidé à l'évolution et à la formation des différents sols, végétation notamment.

Mais si les considérations d'ordre scientifique et théorique tiennent une place importante dans cet ouvrage, les problèmes d'applications pratiques, notamment en matière de sylviculture et d'agronomie, n'ont pas été négligés pour autant : chaque chapitre se termine par des considérations d'ordre pratique. En outre, la troisième partie est exclusivement consacrée à la pédologie appliquée, notamment méthodes d'étude des profils, cartographie des sols amélioration de leurs propriétés.

Étant donné la grande amplitude de la science pédologique, les multiples sciences qui lui servent de base (climatologie, physique, chimie minérale, chimie organique, microbiologie, géologie, minéralogie, phytosociologie, physiologie, écologie, etc.) et les nombreuses sciences appliquées auxquelles elle donne accès (géographie, agronomie, sylviculture, urbanisme, etc.), cet ouvrage doit trouver une large audience dans les milieux scientifiques les plus divers.

634. 51 : 631. 5

GARAVEL (L.). — **La culture du Noyer.** Paris, J. B. BAILLIÈRE et Fils, 294 p., 1959.

Producteur à la fois de fruits et de bois, le Noyer peut reprendre place dans l'économie rurale de nos jours. L'Auteur, secrétaire technique de la Commission du Noyer établie auprès de la Direction générale des Eaux et Forêts, étudie la culture du Noyer aussi bien du point de vue production de fruits que production de bois, sous l'aspect économique comme sous l'aspect technique.

Une première partie de l'ouvrage est consacrée aux produits du Noyer et à leur commercialisation. Dans une deuxième partie, sont passées en revue les principales espèces de Noyer, ses exigences écologiques, les procédés de multi-

plication, les méthodes de semis et plantation, les adversités d'origine atmosphérique et pathologique. Les troisième et quatrième parties traitent respectivement de la culture intensive du Noyer (création de noyeraies à fruits, et leur culture, conditionnement des noix à la ferme, production et bilans d'exploitation), et de sa culture extensive (fruit et bois, ou bois seulement). Enfin une cinquième et dernière partie indique les dispositions législatives et règlementaires relatives à la noix et aux Noyers, ainsi que les organismes se consacrant aux Noyers.

Complété par une partie bibliographique, ce livre constitue un guide précieux pour les cultivateurs de Noyer.

M. L. C.

502. 7.

HAW (R. C.). — **The conservation of natural resources.** London, Faber and Faber Ltd., 256 p., 1959.

Dans ce manuel pratique de lutte contre l'érosion du sol, L'Auteur, s'appuyant sur l'expérience qu'il a acquise en Rhodésie du Sud, expose les méthodes de conservation du sol préconisées en Afrique, mais également applicables dans des pays tels que l'Australie, l'Inde, le Pakistan, l'Iran, etc... Les différents chapitres qui conposent cet ouvrage traitent successivement des points suivants : « Veld » et « Vlei » ; l'érosion du sol, causes et différents types d'érosion ; l'érosion due à l'homme ; comment utiliser le sol dans de bonnes conditions ; les matières organiques et le sol ; l'établissement des cartes ; les mesures de conservation et de protection ; la construction des routes agricoles ; la conservation de l'eau. Une bibliographie et de nombreux dessins et photographies complètent cet ouvrage, qui comporte également, en appendice, une liste des plantes pouvant être utilisées pour lutter contre l'érosion.

M.-L. C.

631. 43 : 631. 51

HENIN (S.), FEODOROFF (A.), GRAS (R.) et MONNIER (G.). — **Le profil cultural. Principes de physique du sol.** Paris, Sté d'Editions des Ingénieurs agricoles (129, Bd St-Germain), 320 p., 1960.

Ce livre a le rare mérite d'être l'œuvre d'une équipe de chercheurs qui a partagé son activité entre les recherches fondamentales, les observations sur le terrain, et les applications aux problèmes pratiques.

Si la nécessité de confronter et de contrôler, à chaque instant, les unes avec les autres et par les autres, est partout affirmée, il est rare en fait de trouver un traité d'agronomie où le souci d'expliquer et de prévoir pour améliorer soit porté aussi haut.

Pour se convaincre de l'originalité et de la perspicacité témoignées par les auteurs en ces divers domaines, il suffira de se reporter, par exemple, à l'étude théorique des facteurs de la stabilité structurale et aux multiples descriptions de la macro-et microdistribution des racines selon l'état structural des horizons superposés.

Ce livre se divise en 5 chapitres :

I. — *Le profil cultural*, qui désigne « la succession des couches de terre individualisées par l'intervention des instruments de culture, des racines des végétaux et des facteurs naturels réagissant à ces conditions » ; le profil cultural peut différer nettement du profil pédologique. Le chapitre décrit les méthodes

d'étude, à la fois par l'observation des coupes de sol et par des mesures de laboratoire ; il traite ensuite des conséquences pour la végétation, de l'état du profil, notamment en ce qui concerne l'alimentation des plantes en eau.

Le chapitre II traite de la *stabilité structurale des sols*, donnée fondamentale pour la compréhension de tout ce qui concerne l'évolution des qualités physiques du sol sous l'influence des agents naturels et des techniques agricoles. L'étude des mécanismes de la dégradation de la structure, particulièrement poussée, selon des concepts originaux, sera précieuse pour tout agronome qui désire clarifier ses idées à cet égard, étant donné qu'il était difficile jusqu'à présent de trouver rassemblées dans un ouvrage les bases scientifiques de la question. La propre méthode des auteurs pour l'appréciation de la stabilité structurale a été contrôlée quant à sa valeur pratique par l'étude des corrélations avec l'état de la végétation en de nombreux types de sols.

Le chapitre III : « *valeur agronomique du profil cultural* » indique, par plusieurs exemples, comment on peut apprécier la valeur agricole de ce profil par une synthèse de ces caractéristiques.

Le chapitre IV traite de l'*amélioration du profil cultural*, et plus spécialement de l'amélioration temporaire de l'état structural de la couche arable et éventuellement du proche sous-sol. La plus grande partie de ce chapitre est consacrée à l'étude des différentes méthodes de travail du sol et du mode d'action des divers instruments aratoires. Alors que jusqu'à présent, le travail du sol était envisagé surtout d'un point de vue mécanique, il est étudié ici en relation avec les propriétés physiques de la terre, ce qui est particulièrement précieux. Une autre partie est consacrée au contrôle de l'eau (drainage et lutte contre la sécheresse).

Le chapitre V traite de l'*amélioration de la stabilité structurale* (notamment par les matières organiques et éventuellement par chaulage). Il est intéressant de constater que ce problème du chaulage, qui paraissait quelque peu épuisé, rebondit à nouveau à la suite des études sur la structure des sols : on ne saurait aujourd'hui déconseiller systématiquement les marnages copieux, puisqu'ils peuvent améliorer beaucoup la stabilité structurale des sols battants, contrairement à l'opinion professée il y a seulement 10 ans.

Le problème de l'amélioration des sols sodiques est un exemple particulièrement frappant de la nécessité d'adapter des principes généraux aux conditions locales, puisque dans ce domaine apparemment limité, les techniques à mettre en œuvre peuvent varier largement selon les caractères chimiques (salure) et texturaux du profil, et que la méconnaissance des données locales peut conduire à de fausses manœuvres, avec des conséquences graves auxquelles il sera difficile ensuite de porter remède.

G. Barbier

551. 494 : 63

Hockensmith (R. D.) éd. — **Water and agriculture.** Washington, American Association for the Advancement of Science, 128 p., 1960.

Ce livre donne le compte rendu d'un symposium de l'Association américaine pour l'Avancement des Sciences tenu à Washington les 29 et 30 décembre 1958.

Ce symposium réunissait un certain nombre de sociétés américaines plus ou moins intéressées par le problème de l'eau en Agriculture. Les autres problèmes (industriels, hydroélectriques...) posés par l'eau ne sont étudiés dans

ce recueil d'articles que dans la mesure où ils ont des répercussions sur l'utilisation de l'eau en Agriculture.

Les articles de la première partie portent sur l'eau dans l'avenir, sous ses aspects économiques et juridiques. La deuxième partie aborde le problème des ressources en eau et de leurs modifications possibles dues aux facteurs climatiques. Dans la troisième partie, les auteurs traitent de l'utilisation de l'eau au niveau du sol. Enfin, la quatrième partie porte sur quelques méthodes et techniques du contrôle de l'eau en Agriculture. Le dernier article, de TANNER, sur le calcul de l'évapotranspiration d'une culture par le bilan énergétique, est spécialement intéressant.

S. de P.

631. 46 : 578. 08

JOHNSON (L. F.), et coll. — **Methods for studying soil microflora. Plant disease relationships.** Minneapolis, Burgess Publ. C°, 178 p., 1959.

Ce manuel, édité sous les auspices du « Technical Committee of Southern Regional Project », est à notre connaissance le plus récent condensé des méthodes et des possibilités de la microbiologie des sols.

Délaissant l'aspect théorique des problèmes posés aux chercheurs, les auteurs se sont appliqués à réunir des informations détaillées sur les techniques utilisées.

Une description suffisante, accompagnée des références bibliographiques, est donnée pour chacune des méthodes proposées.

Les chercheurs désirant obtenir des renseignements pratiques sur l'isolement, la numération, la caractérisation des microorganismes du sol, l'étude de leur pouvoir antibiotique, de leurs interactions avec les végétaux pourront consulter très utilement cet ouvrage.

H. B.

41. 3 : 63

MALI (L.). — **Maatalouden Sanakirja,** — AGRICULTURAL DICTIONARY. Helsinki Kustannusosakeyhtio Otava, 774 p., 1958.

Publié sous les auspices de la « Scientific Agricultural Society of Finland » et préparé, à partir de 1948, avec l'aide de nombreux spécialistes de Finlande, de Suède, d'Allemagne, des U. S. A. et de Grande Bretagne, ce dictionnaire agricole en 4 langues (Finnois, Suédois, Allemand, Anglais) représente un travail de recherche et de mise au point considérable.

La partie principale de l'ouvrage est composée d'un lexique avec entrée dans la langue finnoise. Mais des index suédois, allemand et anglais permettent, grâce à une disposition typographique judicieuse, de se reporter très rapidement à ce lexique et de trouver les termes équivalents dans les trois autres langues. Un index des termes scientifiques complète ce dictionnaire, qui est appelé à rendre les plus grands services à tous ceux qui ont à effectuer des traductions touchant au domaine agricole.

M. L. C.

635.

ORGAN (J.). — **Rare vegetables for garden and table.** London, Faber and Faber 184 p., 1960.

L'auteur, qui pratique lui-même la culture de nombreux légumes d'usage peu courant, a voulu que son expérience puisse profiter à d'autres, jardiniers,

amateurs etc..., et il expose, dans ce livre, les différents aspects de leur culture : place dans la rotation au potager, protection contre les parasites et maladies, conservation, sans oublier des indications pour leur cuisson et des recettes de cuisine...

L'ouvrage s'étend également à des légumes que l'on trouve plutôt sur le Continent qu'en Angleterre, et des lexiques Anglais, Français, Allemand Italien et Espagnol en facilitent l'emploi.

M.-L. C.

PENNINGSFELD (F.). — **Les questions d'alimentation dans la culture des plantes florales et ornementales.** (Die Ernahrung im Blumen-und Zierpflanzenbau). Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 217 p., 1960.

Cet ouvrage n'est pas à proprement parler un manuel de fertilisation appliquée aux plantes d'ornement, mais présente les résultats d'essais effectués pendant 10 ans sur l'alimentation minérale de ces plantes. Les essais ont consisté essentiellement en applications d'éléments fertilisants (éléments majeurs et éléments traces) à des plantes représentant 38 espèces différentes, cultivées sur quartz, tourbe ou mélange tourbe/sable. Il a été ainsi possible de caractériser des symptômes de carences ou de pléthores, de connaître la sensibilité des diverses espèces aux concentrations salines de solutions, de déterminer leur alimentation optima et leurs besoins en éléments fertilisants. Des tableaux donnent la composition de divers organes végétaux pour certaines des cultures étudiées. — 127 figures, dont 64 en couleurs, illustrent l'ensemble de ces recherches, qui présentent un grand intérêt théorique et pratique.

S. T.

581. 9 : 631. 95

POLUNIN (N.). — **Introduction to plant geography and some related sciences.** London, Longmans, 640 p., 1960.

La position de cet ouvrage est assez difficile à définir : les exposés les plus élémentaires de certains aspects de la biologie végétale figurent à côté de considérations beaucoup plus élevées sur la dynamique du peuplement végétal.

S'il s'agit bien par endroits d'une introduction pour lecteur non initié, l'auteur n'oublie-t-il pas parfois son objet premier, et son lecteur pourra-t-il toujours apprécier et tirer profit de toutes les riches observations qui s'adressent davantage à l'agronome averti qu'à un pur botaniste ? On lira par exemple, avec intérêt, l'évolution de la végétation et des sols en région aride sous irrigation, surtout en l'absence de drainage. Ce n'est là qu'un exemple parmi d'autres fort nombreux, mais dispersés au cours de l'ouvrage, comme s'il s'agissait de considérations d'intérêt secondaire. Malgré tout le lecteur sera convaincu que la phytogéographie, de science d'observation qu'elle était, devient une des branches les plus fondamentales de l'agronomie. Ce livre, bien moins élémentaire qu'il se prétend, paraîtra donc un peu touffu à celui auquel il était destiné et, en revanche, l'agronome y trouvera des longueurs et des rappels un peu fastidieux qu'il aurait aimé voir remplacés par des études plus détaillées sur, par exemple, la liaison entre le sol et la végétation dans une région donnée.

Tout en n'omettant rien, on a su éviter de trop spéculer sur les théories relatives à l'origine et à l'évolution du peuplement végétal, se limiter à un

exposé succinct et objectif de la question, pour faire davantage place aux observations plus modestes, mais plus pratiques et plus aptes à développer chez le lecteur le sens des processus biologiques sous-jacents.

Il était bon aussi de rappeler que l'essentiel de nos idées sur l'évolution du peuplement végétal provient de l'étude des régions tempérées et combien dangereuse et fréquente est la tendance de notre esprit à extrapoler quand il se trouve devant une végétation tropicale. Il s'agit là d'une mise en garde pour l'agronome qui, arrivant sous les tropiques, aura malheureusement trop tendance à l'oublier.

Si la culture de l'homme moderne est essentiellement une culture scientifique, ce livre peut figurer en bonne place dans la bibliothèque de « l'honnête homme » du XX^{e} siècle.

H. J.

633. 88 : 582. 4

ROQUES (H.). — **Précis de botanique pharmaceutique. Tome II. Phanérogamie.** Paris, Maloine, 944 p., 1959.

Les ouvrages classiques destinés à l'étude des Phanérogames sont actuellement peu nombreux et le plus souvent épuisés. C'est pour répondre à une nécessité d'enseignement de la Botanique phanérogamique que l'Auteur a rédigé, postérieurement à son précis de Cryptogamie et dans la même collection, un ouvrage de Phanérogamie. Issue de la classification naturelle de A. L. de JUSSIEU et de A. P. de CANDOLLE, la classification moderne adoptée, du moins dans ses grandes lignes, est celle de ENGLER et PRANTL.

Après quelques généralités ayant trait à un aperçu sur l'histoire des classifications tour à tour préconisées au cours des derniers siècles, l'Auteur a adopté, pour l'étude de chaque famille, le plan suivant : distribution géographique ; étude de une ou plusieurs espèces types ; classification simplifiée et description sommaire des espèces retenues avec indications sur leurs propriétés, leurs usages, leur composition chimique ; particularités anatomiques intéressant chaque famille.

Le texte est accompagné d'un grand nombre de figures, et un lexique explicatif des principaux termes techniques mentionnés dans l'exposé complète l'ouvrage qui rendra certainement les plus grands services aux étudiants et à tous ceux que l'étude de la Botanique générale intéresse.

M. L. C.

631. 417. 2

SCHEFFER (F.) et ULRICH (B.). — **Humus und Humusdüngung. Bd I. Morphologie, Biologie, Chemie und Dynamik des Humus.** Stuttgart, F. Enke, 266 p, 1960.

Troisième partie de l'encyclopédie de chimie agricole et de science du sol de SCHEFFER-ULRICH. L'ouvrage comporte 4 parties principales : Morphologie, Biologie, Chimie et Dynamique de l'Humus. Dans la morphologie, les auteurs, présentent les caractéristiques des différents humus sous-aquatiques, semi-terrestres, terrestres (Roh-humus, Moder, Mull, Rohboden humus). La biologie de l'humus étudie la population du sol : microflore, microfaune, mésofaune, macrofaune ; importance de l'édaphon. La chimie de l'humus traite de la structure et des propriétés chimiques des substances humiques et des complexes

organo-minéraux. Dans la dynamique de l'humus, les auteurs étudient les processus d'humification, la participation de l'humus à la pédogénèse, son influence sur les propriétés physiques des sols, son rôle alimentaire et ses fonctions physiologiques. L'ouvrage, qui comporte 22 pages de références bibliographiques, fait état des travaux les plus récents sur la question. Il sera suivi d'un deuxième tome, qui traitera de l'importance de l'humus dans la fertilisation.

S. T.

631. 4 (02)

SCHEFFER (F.) et SCHACHTSCHABEL (P.). — **Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde : I. Teil. Bodenkunde.** Stuttgart, F. Enke Verlag, 332 p., 1960.

Cinquième édition de l'ouvrage bien connu, « Bodenkunde », de F. SCHEFFER et P. SCHACHTSCHABEL, représentant la première partie du traité de chimie agricole et de science du sol. Les multiples progrès effectués dans ce domaine justifient cette nouvelle édition revue et augmentée, bien que l'édition précédente ne date que de 1956. Les nouvelles additions portent essentiellement sur les processus d'entraînement et de dépôt des minéraux argileux, substances organiques, etc... les oxydes libres de silice, alumine, fer et manganèse, la couleur, la densité et la cohésion des sols, les échanges d'ions, la réaction, le potentiel d'oxydo-réduction. En ce qui concerne la structure, les auteurs étudient particulièrement les facteurs qui ont une influence sur la stabilité de la structure et la distribution des pores. Le chapitre « substance organique-humus » n'a pas été étendu, ce sujet ayant fait l'objet d'un ouvrage spécial paru presque simultanément dans la même collection. Les chapitres sur les éléments intervenant dans la nutrition des plantes ont été revus et élargis ; les éléments sélénium, fluor, iode et nickel sont pour la première fois envisagés.

Rappelons les divisions essentielles de cet ouvrage :

Formation du sol — Composition du sol — Propriétés du sol (Échange d'ions, coagulation et peptisation, réaction, potentiel d'oxydo-réduction, structure, densité ; l'eau, l'atmosphère, la température et la couleur du sol ; les organismes vivant dans le sol, les éléments des plantes) — Genèse des sols — Types de sols d'Europe Centrale — Aperçu de la systématique des sols d'Europe Centrale — Appréciation de la valeur des sols.

S. T.

633. 2. 03

SPRAGUE (H. B.). — **Grasslands.** Washington D. C., American Association for the Advancement of Science. 1959, Publ. nº 53, 406 p.

Cet ouvrage, contenant un ensemble de mises au point des problèmes concernant la production fourragère, est rédigé par des chercheurs spécialisés appartenant à des disciplines très diverses.

Les mises au point sont, en général, très claires et présentent les problèmes auxquels elles se rapportent sous un aspect synthétique qu'il est inaccoutumé de rencontrer dans les publications américaines. Ceci fait que cet ouvrage mériterait d'être traduit pour servir de livre de chevet, soit à des scientifiques soit à des vulgarisateurs intéressés par la production fourragère. Les principales têtes de chapitre sont les suivantes :

I — Les sciences en tant que bases de travaux de recherches sur les prairies.

II — La production fourragère dans les régions tempérées humides.
III — L'aspect « mécanisation » de la culture fourragère.
IV — L'utilisation des fourrages et les problèmes connexes de nutrition animale.
V — Estimation de l'intérêt des fourrages sur le plan de la nutrition animale.
VI — La climatologie et les herbages.
VII — L'écologie des herbages.
VIII — La mise en valeur des prairies de l'ouest américain (Range).

J. R.

633. 73 (02)

SPRECHER von BERNEGG (A.). — **Tropische und subtropische Weltwirtschaftspflanzen.** III. TEIL, GENUSSPFLANZEN, 2. BAND : KOFFEE. 2. neu bearb. aufl. von Prof. Dr. C. COGLHAAS, Dr H. J. de FLUITER u. Dr. Herbert P. KOENIG. Stuttgart, F. Enke, 315 p., 66 ill., 1960.

Cette seconde édition de la monographie sur le café parue dans l'Encyclopédie, bien connue, des plantes utiles tropicales et subtropicales de SPRECHER von BERNEGG, constitue une révision complète de la première édition, due à la collaboration d'éminents spécialistes du sujet, C. COOLHAAS, professeur d'agriculture tropicale à l'École supérieure d'Agriculture de Wageningen, H. J. de FLUITER (qui a rédigé le chapitre sur les « déprédateurs et maladies ») et P. KOENIG (pour le chapitre, « Production, consommation et importance économique du café »).

Depuis 1934, date de la première édition, de nouvelles régions ont en effet été affectées à la caféiculture, et des conceptions nouvelles sont venues modifier les anciennes techniques de production, ce qui explique l'abondance de la littérature parue depuis cette époque sur le sujet.

Les différents aspects de la production et de l'économie du café sont passés en revue en 9 chapitres : Historique ; morphologie, physiologie et systématique des caféiers ; facteurs du milieu ; opérations culturales ; déprédateurs et maladies ; récolte et technologie ; étude de la fève (morphologie et chimie) ; utilisation ; zones de production et importance économique. Chaque chapitre est accompagné d'une bonne bibliographie sélective.

Cette excellente monographie, bien présentée et agréable à consulter, donne sous une forme concise, tout ce qu'il est essentiel de connaître sur le sujet. Elle rendra de grands services à tous ceux qu'intéressent la production et le commerce du café.

D. K.

63 (411)

SYMON (J. A.). — **Scottish farming. Past and present.** Edinburgh and London, Oliver and Boyd, 475 p., 1959.

Dans cette histoire de l'agriculture Écossaise, des temps anciens jusqu'à nos jours, l'Auteur s'est principalement attaché aux aspects pratiques de son sujet, et en particulier à l'influence qu'ont exercée les changements successifs survenus dans les techniques agricoles, sur le mode de vie de la population rurale Écossaise. Les différentes étapes de l'évolution de l'agriculture en Écosse, depuis sa forme nomade et pastorale jusqu'à la période d'après la deuxième guerre mondiale, la mise en œuvre des méthodes modernes d'exploitation,

les améliorations apportées par la mécanisation et le développement de nouvelles cultures, telles sont les questions traitées au cours des 27 chapitres de cet ouvrage qui fait le point de la situation actuelle de l'agriculture Écossaise.

M. L. C.

551. 311. 2 (02)

TERMIER (H.) et TERMIER (G.). — **Érosion et sédimentation. Introduction à la géologie générale et à la paléogéographie.** Paris, Masson, 1960, 412 p.

Cet ouvrage est destiné à faire la synthèse, pour la géologie sédimentaire, des données fournies par les sciences voisines.

Il commence par un certain nombre de considérations qui préparent l'étude proprement dite qui fait l'objet du livre. Il s'agit des rapports climat/genèse du relief ; ceci amène à l'étude des paléoclimats, notamment ceux des glaciations quaternaires, avec leur conséquence probable, les variations du niveau marin. Les mouvements du sol sont envisagés dans leurs relations avec la formation du relief. Le relief sous-marin fait l'objet d'une attention particulière et, notamment, ce qui se passe à la limite terre-mer.

Ensuite l'auteur passe à l'étude générale de l'érosion et de la sédimentation : Agents d'érosion — Morphologie et érosion — Sédimentation continentale et marine. Il étudie la formation des sols, dont il donne une classification zonale. Viennent alors des examens détaillés de sédimentation particulière : sédimentations marines, salifère carbonatée, exemple de sédimentation marine complexe.

L'ouvrage se termine par l'étude de la transformation des sédiments après leur dépôt.

Le livre comporte de très nombreuses références bibliographiques et un index des termes cités.

R. G.

581. 5 : 631. 4

VIENNOT-BOURGIN (G.). — **Rapports du sol et de la végétation** Paris, Masson et Cie, 183 p.,1960.

Ce volume publie le compte rendu d'un colloque organisé le 1er juin 1960 par la Société botanique de France.

Le sol et la végétation ne peuvent exister l'un sans l'autre. Il y a un équilibre biologique entre la plante et le sol dont l'agriculteur doit tenir compte en vue d'une utilisation optimum ; il doit surtout veiller à ne pas le détruire, ce qui n'est pas toujours facile, car les différents facteurs dont il dépend ne sont pas tous bien connus.

Ce volume essaie de préciser l'action de quelques uns de ces facteurs.

La première partie porte sur l'influence de la végétation sur le sol, en particulier sur les processus de pédogenèse et la conservation du sol.

La seconde partie est consacrée à l'influence du sol sur la végétation spontanée, adventice et cultivée, ainsi qu'à l'influence de certains sels toxiques.

S. de P.

581. 14. 02

WHYTE (R. O.). — **Crop production and environment.** New ed., London, Faber, 392 p., 1960.

Cette nouvelle édition complète celle de 1946. l'Auteur y expose surtout les études entreprises dans les différents pays depuis cette date : un tiers du contenu est consacré aux recherches scientifiques fondamentales et le reste aux applications concernant la distribution et les possibilités de rendement des différentes cultures dans le monde.

Parmi les nouveautés de cette édition on peut citer un important chapitre traitant des équipements (phytrotrons) actuellement en usage dans la recherche et un autre entièrement consacré à la gibbérelline.

On doit également signaler les études sur la compétition pour le facteur lumière et sur le retard de croissance et le retard à la floraison provoqués par des produits chimiques.

S. de P.

63 (41)

WILLIAMS (H. T.). — **Principles for British agricultural policy.** London, Oxford Univ. Press, 317 p., 1960.

A la fin de la guerre, la Nuffield Foundation a groupé, sous la direction de Sir Frank ENGLEDOW, alors professeur d'agriculture à Cambridge, un certain nombre d'experts spécialisés dans les domaines des sciences agricoles, de la sociologie, de l'économie et de la nutrition humaine, pour étudier et rechercher les principes qui devraient entrer en jeu dans l'élaboration d'une politique agricole à long terme en Angleterre. C'est le résultat de cette étude que l'Auteur présente dans cet ouvrage où sont exposés, en cinq parties, les principes qui dérivent : 1°) de l'étude historique de l'agriculture britannique, 2°) de l'étude de la science agricole et des systèmes de culture, 3°) de la sociologie rurale, 4°) de considérations stratégiques et 5°) de considérations sur l'offre et la demande des produits agricoles.

M. L. C

543 /545

Mises au point de chimie analytique pure et appliquée et d'analyse bromatologique. — Publiées sous la direction de J. A. GAUTIER. 8° série, Paris, Masson, 148 p., 1960.

Cette nouvelle série comporte les cinq études suivantes :

CHOVIN (P.). : La chromatographie en phase gazeuse.

DESVIGNES A.) : Les possibilités de l'analyse par voie microbiologique.

DEVILLERS (P.) : Analyse bactériologique des sucres et sirops.

PERCHERON (F.) : Dosage des groupements C-méthyle et identification des chaînes alcoylées dans les molécules organiques.

LE MOAN (G.) : Problèmes posés par l'emploi des pesticides en agriculture.

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1960

Mémoires originaux.

Bastisse (E.-M.). — Rôle vecteur de divers anions minéraux ou organiques dans les phénomènes géochimiques et physiologiques.... 441

Blanchet (R.). — Adsorption et dilution isotopique des ions phosphoriques au contact des hydroxydes métalliques et des argiles.... 55

Blanchet (R.) et **Périgaud (S.).** — Sur l'appréciation du niveau des réserves potassiques des sols ; possibilité d'utilisation d'un test MORGAN-BARBIER amélioré.......................... 349

Blanchet (R.), Périgaud (S.), Chaumont (C.) et Nadeau (J. C.). — Acidité d'échange et aluminium libre ou échangeable des sols... 621

Bouvattier (C.). — Notes analytiques sur le dosage de l'acide phosphorique dans les sols.. 219

Bouvattier (C.). — Contribution à l'étude agronomique de la région d'Ancenis.. 577

Carles (J.) et Decau (J.). — De quelques conditions susceptibles de modifier les proportions des acides aminés du sol............. 557

Chaminade (R.). — Expérimentation en petits vases de végétation types d'essais pour tester l'efficacité des engrais humiques...... 121

Chaminade (R.). — Action stimulante de substances organiques sur la croissance de l'*Aspergillus niger*........................ 365

Cotte (J.) et Gielfrich (M. L.). — Observations sur le dosage colorimétrique de l'acide phosphorique........................ 713

Dommergues (Y.). — Précision des techniques d'analyse et d'échantillonnage en biologie des sols.............................. 469

Esquevin (J.). — Les silicates de zinc. Etude de produits de synthèse.. 497

Feodoroff (A.). — Evaluation de la stabilité structurale d'un sol (Indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser...... 651

Franc de Ferrière (J.-J.), Blanchet (R.), Millot (G.) et Camez (Th.). — Influence de la nature des argiles sur la dynamique du potassium dans les sols de quelques champs d'essais.............. 163

Grosman (R.). — Observations sur le dosage de l'acide phosphorique dans les végétaux.. 359

Jeanson-Luusinang (Mme C.). — Fractionnement par densité de la matière organique des sols.............................. 481

Jouis (E.) et Lecacheux (M.-Th.). — Précisions sur l'utilisation de divers colorants pour le dosage complexométrique du calcium et du magnésium dans les amendements, dans les sols et dans les plantes.... 113

Jouis (E.), Lecacheux (M.-Th.) et Cauchy (F.). — Utilisation du tripolyphosphate de soude comme peptisant dans l'analyse physique des sols.. 229

Lefèvre (G.) et Hiroux (G.). — Considérations sur la minéralisation et l'utilisation des réserves azotées du sol................ 135

Le Houerou (H.-N.). — Contribution à l'étude des sols du sud tunisien 241
Liwerant (J.). — Effets des principaux éléments fertilisants sur le développement végétatif et sur la production du pêcher 93
Muller (J.). — Echanges des ions cuivriques sur les colloïdes minéraux. I. — Phénomènes d'adsorption 75
Plaisance (G.) et Van der Marel (H. W.). — Contribution à l'étude des limons des plateaux de la forêt de Chaux (Jura). I 601
Plaisance (G.) et Van der Marel (H. W.). — Contribution à l'étude des limons des plateaux de la forêt de Chaux. II 661
Rivière (J.). — Les besoins en vitamines du groupe B des bactéries du sol .. 333
Rivière (J.). — Etude de la rhizosphère du blé 397
Simon (G.). — L'enfouissement des pailles dans le sol. Etude générale et répercussions sur la microflore du sol (première partie) 5
Simon (G.). — L'enfouissement des pailles dans le sol. — Etude générale et répercussions sur la microflore du sol (deuxième partie) 177
Simon-Sylvestre (G.). — Les composés du soufre du sol et leur évolution, rapports avec la microflore ,utilisation par les plantes 311

Bibliographie

ALLEN (G. R.). — Agricultural marketing policies 723
BLAIS (R.). — Flore pratique 723
BRUNING (D.). — Forstdüngung 723
CRETE (P.). — Précis de botanique : II. Systématique des Angiospermes .. 724
DEMOLON (A.). — Principes d'agronomie : T. I. Dynamique du sol 724
DUCHAUFOUR (P.). — Précis de Pédologie 725
GARAVEL (L.). — La culture du Noyer 725
HAW (R. C.). — The conservation of natural resources 726
HENIN (S.), FEODOROFF (A.), GRAS (R.) et MONNIER (G.). — Le profil cultural. Principes de physique du sol 726
HOCKENSMITH (R. D.). — Water and agriculture 727
JOHNSON (L. F.), et coll. — Méthods for studying soil microflora. Plant disease relationships 728
MALI (L.). — Maatalouden Sanakirja — Agricultural dictionary 728
ORGAN (J.). — Rare vegetables for garden and table 728
PENNINGSFELD (F.). — Les questions d'alimentation dans la culture des plantes florales et ornementales 729
POLUNIN (N.). — Introduction to plant geography and some related sciences .. 729
ROQUES (H.). — Précis de botanique pharmaceutique. Tome II. Phanérogamie .. 730
SCHEFFER (F.) et ULRICH (B.). — Humus und Humusdüngung. Bd I. Morphologie, Biologie, Chemie und Dynamik des Humus 730
SCHEFFER (F.) et SCHACHTSCHABEL (P.). — Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde. I. Teil. Bodenkunde 731
SPRAGUE (H. B.). — Grasslands 731
SPRECHER von BERNEGG (A.). — Tropische und subtropische Weltwirtschaftspflanzen 732

SYMON (J. A.). — Scottish farming. Past and present............ 732
TERMIER (H.) et TERMIER (G.). — Érosion et sédimentation. Introduction à la géologie générale et à la paléogéographie.......... 733
VIENNOT-BOURGIN (G.). — Rapports du sol et de la végétation........ 733
WHYTE (R. O.). — Crop production and environment.............. 734
WILLIAMS (H. T.). — Principles for British agricultural policy...... 734
Mises au point de chimie analytique pure et appliquée et d'analyse bromatologique 734

TABLE ALPHABÉTIQUE

Allen (**G. R.**) 723
Bastisse (**E. M.**) 441
Blais (R.) 723
Blanchet (**R.**) 55
Blanchet (**R.**) et **Périgaud** (**S.**) 349
Blanchet (**R.**), **Périgaud** (**S.**), **Chaumont** (**C.**) et **Nadeau** (**J. C.**) 621
Bouvattier (**C.**) 219-577
Bruning (D.) 723
Carles (**J.**) et **Decau** (**S.**) 557
Chaminade (**R.**) 121-365
Cotte (**J.**) et **Gielfrich** (**M. L.**) 713
Crété (P.) 724
Demolon (A.) 724
Dommergues (**Y.**) 469
Duchaufour (P.) 725
Esquevin (**J.**) 497
Feodoroff (**A.**) 651
Franc de Ferrière (**J. J.**), **Blanchet** (**R.**), **Millot** (**G.**) et **Camez** (**Th.**) 163
Garavel (L.) 725
Grosman (**R.**) 359
Haw (R. C.) 726
Hénin (S.), Féodoroff (A.), Gras (R.) et Monnier (G.) 726
Hockensmith (R. D.) 727
Jeanson-Luusinang (**Mme C.**) 481
Johnson (L. F.) 728
Jouis (**E.**) et **Lecacheux** (**M. Th.**) 113
Jouis (**E.**), **Lecacheux** (**M. Th.**) et **Cauchy** (**E.**) 229
Lefevre (**G.**) **et Hiroux** (**G.**) 135
Le Houerou (**H. N.**) 241
Liwerant (**J.**) 93
Mali (L.) 728
Muller (**J.**) 75
Organ (J.) 728
Penningdfeld (F.) 729
Polunin (N.) 729
Plaisance (**G.**) **et Van der Marel** (**H. W.**) 601-661
Rivière (**J.**) 333-397
Roques (M.) 730
Scheffer et Uhlrick 730
Scheffer et Schachtschabel 731
Simon (**G.**) 5-177
Simon-Sylvestre (**G.**) 311
Sprague (M. B.) 731
Sprecher von Barnegg (A.) 732

SYMON (J. A.) 732
TERMIER (M.) et TERMIER (G.) 733
VIENNOT-BOURGIN (G.) 733
WHYTE (R. O.) 734
WILLIAMS (M. T.) 734

Le Directeur Gérant : B. LACLAVIÈRE.

Imprimerie BUSSIÈRE Saint-Amand (Cher), France. — 5-7-1961
Dépôt légal : 3e trimestre 1961 *No d'impression : 839*